

Área de Ingeniería Mecánica

Proyecto Fin de Carrera

Optimización de troqueles para punzonado AISI 316 mediante ajuste macho-matriz



Universidad Carlos III de Madrid

Ingeniería Industrial

Leganés, Marzo 2015

Autor: Javier Castro Rodríguez

Tutor: Jose Luis Cantero Guisández

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi familia y amigos el haber estado siempre a mi lado durante todo este tiempo animándome siempre a continuar hasta haber conseguido llegar a este momento final.

Agradecimiento especial a todo el departamento de Ingeniería de Fabricación, con los que he tenido tan estrecha y buena relación durante alrededor de los últimos ocho años.

A Jose Luis Cantero por ayudarme a poder poner el broche final a una carrera, que desde que empecé a trabajar hace seis años cada vez parecía más difícil ponerlo.

A Nacari Marin, que aunque ahora se encuentra en Panamá, sirvió siempre de gran apoyo y ayuda.

Al ya jubilado Jose Canteli, tutor de mi primer proyecto, que trató de enseñarme muchas cosas, pero que con los años, la principal enseñanza que ha quedado en mi cabeza, es que las cosas en la vida hay que hacerlas con intensidad, si se trabaja con intensidad, si se practica deporte con intensidad, si se viaja con intensidad..., y yo creo que estoy siguiendo esa máxima lo mejor que puedo.

Índice

1. Introducción	6
1.1. Punzonado	6
1.1.1. Conceptos Generales	6
1.1.2. Descripción de una Estampa o Matriz de Corte	9
1.1.3. Desgaste de las Matrices	10
1.1.4. Juego entre Punzón y Matriz	11
1.1.5. Esfuerzo Necesario para el Corte	12
1.2. Aceros Inoxidables Austeníticos	13
1.2.1. Tipos de Aceros Inoxidables	13
1.2.2. Designación e Identificación	15
1.2.3. Selección de un Acero Inoxidable	15
1.3. Elementos Finitos	17
1.4. Objetivos del Proyecto	19
1.5. Estructura del Proyecto	20
2. Modelo de Elementos Finitos	22
2.1. Constitución del Modelo	22
2.1.1. Elementos que constituyen el modelo	22
2.1.2. Geometría	23
2.1.3. Materiales	24
2.1.4. Mallado	25
2.1.5. Condiciones de Contorno	27
2.1.6. Rozamientos	27
2.1.7. Criterio de Rotura	27

2.1.8. Otros parámetros a tener en cuenta	29
2.2. Resultados y Optimizaciones	29
2.3. Validación del Modelo	30
2.3.1. Similitud Geométrica	32
2.3.2. Similitud Numérica	34
3. Análisis de Resultados	41
3.1. Fuerzas en Función de la Holgura	42
3.2. Rebabas en Función de la Holgura	46
3.3. Perfil del Recorte en Función de la Holgura	49
3.4. Inicio de la Fractura en Función de la Holgura	55
4. Influencia del Desgaste en el Utillaje	57
4.1. Fuerzas en Función del Desgaste	59
4.2. Rebabas en Función del Desgaste	63
4.3. Inicio de la Fractura en Función del Desgaste	66
4.4. Tensiones en el Utillaje en Función del Desgaste	67
4.3.1. Utillaje Nuevo	68
4.3.2. Utillaje Desgastado	69
5. Conclusiones	71
6. Trabajos Futuros	73
7. Anexos y Referencias	74
7.1. Anexos	74
7.1.1. Anexo I: Aspectos analíticos y tecnológicos del proceso de punzonado de chapa.	74
7.1.2. Anexo II: Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network.	80

7.1.3. Anexo III: Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment.....	86
7.1.4. Anexo IV: Blanking tool wear modeling using the finite element method ..	89
7.2. Referencias.....	94

1. Introducción

1.1. Punzonado

1.1.1. Conceptos Generales

El punzonado es una operación mecánica con la cual, mediante herramientas especiales aptas para el corte, se consigue separar una parte metálica de otra obteniéndose instantáneamente una figura determinada.

Es una operación que va unida a los fenómenos de la transformación plástica y que, por otra parte, en la práctica, resulta casi siempre ligada al proceso del estampado propiamente dicho. El punzón, en el primer tiempo y prosiguiendo la presión que ejerce sobre la plancha, completa su labor con una compresión del material, con lo cual da lugar a una deformación plástica del medio interpuesto; se origina, en esta primera fase, un vientre cóncavo (figura 1, letra a). Luego, el punzón, encontrando libre el camino en la matriz, prosigue su acción ocasionando una expansión lateral del medio plástico, sin remontar el material. El esfuerzo de compresión se convierte, un instante, igual a la resistencia a la cortadura. En estas condiciones, sobreviene un brusco desgarró y el trozo de plancha sujeto al punzón, se separa del resto y cae al fondo de la matriz (figura 1, letra b); hemos realizado un trabajo de cortadura. Durante el punzonado se ha comprobado que, en la proximidad de los hilos cortantes de las herramientas, las fibras de la chapa se doblan hacia abajo siguiendo, por breves instantes, el movimiento del punzón (como si inicialmente quisiera escapar a la separación) y después, reaccionan para oponerse a la acción del corte; pero siendo la acción superior a la reacción, vence toda resistencia pasiva y origina, como ya se ha dicho anteriormente, la escisión de las fibras. Estas fibras, por haber sido castigadas, quedan deformadas y comprimidas a lo largo de todo el perfil cortado. Debido a la elasticidad del material, tienen lugar reacciones internas que se manifiestan en las fibras cortadas, con lo que se produce un frotamiento dentro de las paredes de deslizamiento; como es natural, tal frotamiento

dificulta la salida del disco cortado de la matriz y la extracción del punzón del agujero de la chapa. Las líneas de fuerza pueden verse en la figura 1.

Consideremos la relación entre el espesor s de la chapa y el diámetro d del punzón. Se ha hallado teórica y prácticamente que tal relación s/d , para la chapa de hierro y punzones de acero templado, toma el valor de 1,2; en otros términos:

$$S_{\text{máx}} = 1,2 d \text{ en la condición límite.}$$

Podemos deducir el concepto práctico siguiente: la chapa de hierro, para que pueda ser cortada con punzón de acero templado, debe tener un espesor menor o igual al diámetro del punzón mismo.

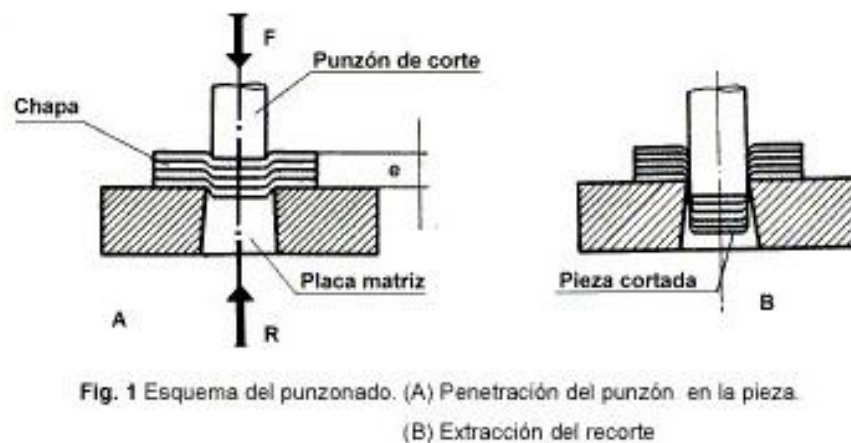


Fig. 1 Esquema del punzonado. (A) Penetración del punzón en la pieza.
(B) Extracción del recorte

Figura 1: Chapa sometida a la operación de corte

El punzonado de la chapa ha encontrado frecuentes aplicaciones en el campo de la industria metalúrgica.

Con este procedimiento se puede también obtener la forma cuadrada o hexagonal de algunos tipos de tuercas para tornillos y pernos. Dichos elementos, en lugar de obtenerse mediante el torneado de una barra de sección cuadrada o hexagonal (los cuales resultaría muy caros por el tiempo requerido para el mecanizado) se obtienen directamente de una tira de chapa del mismo espesor que la tuerca. Mediante punzones convenientemente dispuestos, en relación con las matrices, se cortan también

directamente los agujeros para el tornillo; se recurre a la máquina-herramienta sólo para el roscado.

Mediante el corte también se pueden obtener tres tuercas a la vez, disminuyendo el coste de producción por el ahorro de tiempo y material.

La idea del punzonado ha surgido evidentemente de la necesidad productiva. Por este motivo, dicho procedimiento viene aplicándose en la preparación de trozos de chapa, cartón u otros materiales. Con el punzonado se separa simplemente, mediante útiles adecuados, un trozo de chapa sin alterar el espesor. Si por el contrario, la transformación se realiza de tal modo que también el espesor del material se modifica y las herramientas de dar forma presentasen, ya en una, ya en otra, o en ambas, las puntas en relieve o huecas y sin que una cara se semejara a la otra, entonces deberíamos emplear el término acuñar (por ejemplo, en las monedas). Esta última definición se ha hecho con el objeto de no confundir dos operaciones distintas. El punzonado es, en general, la primera operación que se realiza para la obtención de piezas de chapa. La figura obtenida también puede representar la primera fase en el desarrollo de una pieza para embutir, reproduciendo exactamente la forma en que debe ser cortada la chapa; con el punzonado se evita al operario la necesidad de conocer el dibujo y el que pueda equivocarse en la interpretación de las cotas; además se elimina la necesidad de repetir el recortado a mano y se realiza la operación de un modo rápido y sencillo, pudiéndose confiar a operarios no especializados.



Figura 2: Prensa adecuada para punzonado

1.1.2. Descripción de una Estampa o Matriz de Corte

El corte de la chapa se realiza mediante el empleo de útiles especiales denominados matriz de corte o hierro de cortar. A los efectos del trabajo de corte de la chapa, estas matrices constituyen el utillaje más completo. Una matriz sencilla se compone de dos partes fundamentales: el punzón y la matriz propiamente dicha.

El punzón, según su sección, define el contorno de la pieza a cortar. El filo de corte lo constituye el perímetro exterior del punzón y el perímetro interior del agujero de la matriz. Una matriz completa se compone además: de un bloque o mazo, que actúa de guía del punzón; de dos chapas, que tienen por objeto crear un pasillo por el que se hace deslizar la tira o cinta de chapa a cortar; de un sistema de tope destinado a fijar el paso según el cual debe avanzar la tira de chapa por cada carrera del órgano móvil de la prensa. Los bordes de la chapa, sirven también para guiar la tira de chapa. Por cada carrera vertical del elemento móvil de la prensa y, naturalmente, del punzón, se realiza la operación de corte. De esto se deduce que este sistema admita la repetición continua del proceso, gracias al cual se puede obtener (admitiendo igual destreza y realizándolo con dispositivos mecánicos) una eficaz y regular producción continua de piezas iguales.

1.1.3. Desgaste de las Matrices

El esfuerzo de cortadura, que ha de vencer la resistencia del material, repercute en sus efectos sobre los filos de corte, que pierden su filo inicial después de haber producido gran cantidad de piezas. De ahí resulta que piezas iguales presenten un contorno poco definido y lleno de rebabas. Por necesidades de tipo económico y práctico, se rehabilita la matriz, es decir: una vez templados el punzón y la matriz, se repasan con la muela los filos de corte hasta obtener de nuevo los cantos vivos. Las pérdidas de material además de las provocadas por los esfuerzos dinámicos del corte, pueden ser debidas también a hechos accidentales como astillados, desgranamientos y resquebrajaduras, que se producen especialmente en correspondencia a los cantos de los punzones y de las matrices. Las causas que pueden dar lugar a estos inconvenientes son múltiples: material de la estampa defectuoso, técnica constructiva deficiente, mal montaje de la estampa, juegos de acoplamiento inadecuados entre punzón y matriz, mal uso de la estampa y emplazamiento incorrecto, entretenimiento poco cuidado, material de corte de calidad baja o con superficies sin decapar y con cascarilla, presencia de granos endurecidos en el material, caída de cuerpos extraños entre las aristas cortantes durante el funcionamiento de la estampa. En todos estos casos la pérdida del material para la rehabilitación de la estampa es importante (hasta 1mm.), teniendo presente que la cota total de material a afilar varía de 6 a 8 mm.

En los grandes complejos industriales bien organizados se adopta reunir en una ficha, para cada estampa, todas las anotaciones de los elementos que interesan para el entretenimiento, o sea: fecha de terminación y entrega de la estampa, número de las piezas cortadas en cada cometido, intervenciones, pérdidas de material en los afilados.

Si consideramos una estampa normal es necesario eliminar, con una operación de rectificado, de 0,1 a 0,2 (promedio 0,15mm.) de espesor de material. Como la parte cilíndrica de la matriz suele tener cerca de 6mm., resulta que hasta rebajar el total de esta cota podrán hacerse: $n=6/0,15=40$ rectificados.

Como antes de hacer un rectificado se pueden cortar de 20.000 a 30.000 piezas (en el caso de un punzón cilíndrico de pequeñas dimensiones), resulta que la matriz podrá

durar para cortar $n_1=25.000 \times 40=1.000.000$ de piezas (de material dulce y de un espesor de 1mm.), siendo 25.000 el valor medio.

Hemos visto pues, como una matriz podrá usarse largo tiempo sin sufrir ninguna modificación ni sustitución de alguna parte.

1.1.4. Juego entre Punzón y Matriz

La exactitud de las piezas obtenidas mediante el punzonado depende, en primer lugar, de la precisión con que hayan construido las matrices. Para las formas geométricas sencillas la precisión se consigue con relativa facilidad mediante los instrumentos corrientes de medida. Para la verificación de perfiles complicados se recurre al sistema óptico de aumentos. En este sistema se registra, sobre una hoja de papel, la línea de tolerancia del contorno del punzón y de la matriz. Proyectado este juego sobre la pantalla, resulta visiblemente aumentado y hace que sea posible la lectura, que servirá para indicar el lugar donde deben retocarse las herramientas. El juego entre el punzón y la matriz depende del grueso de la chapa y de la calidad del material, que podrá ser duro, dulce o blando. Para punzones pequeños, agujereando chapa de espesor limitado, el juego no debe existir prácticamente; pero teniendo que trabajar chapas de elevado espesor limitado, el juego debe ser aplicable. Para la chapa metálica, generalmente, está subordinado al espesor y varía proporcionalmente con éste. El juego u holgura, considerado bajo el punto de vista de las diferentes clases de materiales, tendrá que ser mayor para el acero laminado duro que para el acero dulce, latón y aluminio. Para punzones de grandes dimensiones, tendrá que ser de proporciones ligeramente mayores, mientras que para punzones de tamaño normal será constante para cada dureza del metal.

También debemos tener presente que, después del punzonado, el material alrededor del agujero se contrae escasamente al ser librado de la presión de los útiles. En trabajos de precisión, deberán aumentarse las dimensiones (valores centesimales) del punzón y de la matriz. El valor del juego entre el punzón y la matriz puede variar, según los casos, del 5% al 13% del espesor de la chapa. En general, se estima menor el porcentaje para

los agujeros pequeños de precisión; en los cortes de mayores dimensiones y para mayores espesores se aumenta el porcentaje hasta alcanzar el valor máximo.

Una determinación justa del juego entre punzón y matriz significa una prolongada duración de las aristas de corte de las herramientas. Según experiencias realizadas ha resultado, por ejemplo, que un juego de 0,015mm. Asignado a una pareja de herramientas, ha permitido cortar 100.000 de un determinado material y espesor; con un juego de 0,075 mm. Se cortaron 35.000 piezas y con un juego de 0,130 mm. Sólo pudieron cortarse 12.200 (en igualdad de condiciones y admitiendo una rebaba, sobre las aristas de las piezas cortadas, no superior a 0,15 mm)

Al determinar los diámetros del punzón y de la matriz, es necesario tener en cuenta que el diámetro de la matriz determina las dimensiones de la pieza y, por lo tanto, es necesario precisar exactamente tales dimensiones; el juego deberá obtenerse reduciendo el diámetro del punzón. El diámetro de éste, por el contrario, determina las dimensiones del agujero y, por ello, se requiere igual exactitud; el juego debe obtenerse aumentando el diámetro de matriz. Esta norma sirve para todos los perfiles.

1.1.5. Esfuerzo Necesario para el Corte

El punzón, en el momento de tomar contacto con la chapa, inicia sobre el material su acción de compresión seguida de la de corte.

En todo el contorno del punzón y de la matriz, sobreviene una presión continua por parte del punzón y una reacción por parte del material. El punzón, continuando en su descenso, presiona con su cabeza una porción de chapa y la separa completamente del resto; esto se debe a la acción de los filos cortantes de la herramienta, tal como ocurre similarmente durante el corte con tijeras. En esta acción hemos vencido a la chapa con un esfuerzo superior a sus posibilidades de resistencia molecular interior, a pesar de haber habido una reacción en todo el contorno de la figura y en todo el espesor de la chapa.

El esfuerzo cortante necesario puede determinarse fácilmente. Sean:

p = perímetro de la figura, en mm.

s = espesor de la chapa, en mm.

σ_T = carga de rotura del material por cortadura, en Kg/mm^2

Q = esfuerzo cortante total necesario, en Kg.

σ_R = carga de rotura por tracción, en Kg/mm^2 .

El valor de Q viene dado por:

$$Q = p \cdot s \cdot \sigma_T$$

Donde:

$$\sigma_T = 3/4 \text{ a } 4/5 \text{ de } \sigma_R$$

Fuente: libro de Prof. Ing. Enrico Bugini, *Principi per la lavorazione plastica dei metalli*, Bolonia.

1.2. Aceros Inoxidables Austeníticos

Este proyecto se centra en el plegado de los aceros inoxidables. Los aceros inoxidables son básicamente aleaciones de hierro-cromo. Otros metales actúan como elementos de aleación, pero el más importante es el cromo (mínimo 12%), donde su presencia es indispensable para otorgar la resistencia a la corrosión deseada. Los aceros inoxidables son utilizados donde es necesario resistencia a la corrosión, resistencia a altas y bajas temperaturas, resistencia a tracción, ductilidad, apariencia, etc.

1.2.1. Tipos de Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables están divididos en grupos de acuerdo con la micro-estructura básica formada y con la posibilidad de endurecimiento por tratamiento térmico, los grupos principales son los martensíticos, los ferríticos, los austeníticos, los dúplex y los endurecidos por precipitación.

- Aceros Inoxidables Martensíticos

Son Aceros aleados al cromo y endurecibles por tratamiento térmico de temple, contienen de un 13 a un 17% de cromo y del 0 al 2% de níquel, su resistencia a la corrosión es más baja que la de los otros tipos y pueden alcanzar hasta 1400 Mpa de resistencia a la tracción; los más comunes son: AISI 410, AISI 420 y AISI 440.

- Aceros Inoxidables Ferríticos

Son Aceros aleados al cromo, (de un 12 a un 30%) que no endurecen significativamente por tratamiento térmico. Son magnéticos y superiores en poder anticorrosión que los martensíticos. Su coste es bajo por no contener níquel. El AISI 430 y el AISI 436 son los más representativos de este grupo.

- Aceros Inoxidables Austeníticos

Son Aceros no magnéticos, aleados al cromo (16 al 25%) y al níquel (7 al 20%) que solamente endurecen por deformación en frío (endurecimiento mecánico). Son los inoxidable más ampliamente utilizados. Su resistencia a la corrosión es superior a los demás y no son magnéticos aunque pueden adquirir una cierta imantación por deformación en frío. Los aceros de la serie 300 (AISI 304, AISI 302, AISI 304L, AISI 310, AISI 316, AISI 316L, AISI 317, AISI 321 y AISI 347) son los más significativos de este grupo, siendo el AISI 304 el más ampliamente usado y representativo.

- Aceros Duplex

Son una combinación de los inoxidable austeníticos y de los ferríticos. Los más representativos son el tipo 2205 y el S31803, superiores en resistencia y poder anticorrosivo.

- Aceros endurecidos por precipitación

Contienen cromo y níquel además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen alta resistencia y tenacidad y buena resistencia a la corrosión.

1.2.2. Designación e Identificación

Se usan tres clasificaciones generales:

- Estructura metalúrgica
- Sistema Unificado, desarrollado por Sociedad americana para Pruebas de Materiales (ASTM) y la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE).
- Sistema AISI (Instituto Americano de la Siderurgia, American Iron and Steel Institute) que establece la clasificación de los aceros inoxidables en los tres grupos siguientes:
 - Aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel, serie 200.
 - Aceros austeníticos al cromo-níquel, serie 300.
 - Aceros ferríticos y martensíticos al cromo solo, serie 400.

Esta unificación se ha llevado a cabo para limitar la multiplicidad de tipos y prescripciones previamente existentes.

1.2.3. Selección de un Acero Inoxidable

La selección de un acero inoxidable depende de un grupo de propiedades, debiendo ser considerados los siguientes factores:

- **Resistencia a la corrosión química:** agentes corrosivos, concentración, contaminantes, temperatura.
- **Propiedades mecánicas:** tracción, compresión, torsión, flexión, impacto, etc.

- **Características de fabricación:** conformabilidad, mecanizado, deformación en frío, soldadura, etc.
- **Características de acabado:** apariencia, rugosidad, brillo, facilidad de limpieza, facilidad de esterilización, etc.
- **Coste Total**

La elección de un acero inoxidable depende de muchos factores, por consiguiente es necesario realizar un balance entre todas sus características para una correcta aplicación.

En este trabajo de investigación se ha elegido el acero inoxidable austenítico por ser el inoxidable más empleado en la industria representando este tipo más del 50% del consumo total de aceros inoxidables. Dentro de este grupo se ha escogido el AISI 316 por ser ampliamente utilizado y por tener un conjunto de propiedades que lo convierten en un acero de alta resistencia, por lo que con él podremos extraer unas conclusiones que estén cerca del límite de las resistencias del utillaje utilizado.

Entre estas propiedades destacan:

- Elevada resistencia a la corrosión.
- Elevada conformabilidad.
- Buenas características mecánicas.
- Elevada resistencia a la fluencia.
- Elevada tenacidad incluso a temperaturas criogénicas.
- Buena resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a sollicitaciones por fatiga.
- Características elevadas de deformación en frío.
- Elevada soldabilidad.
- Altas características de higiene.

- Muy baja permeabilidad magnética, aunque aumenta por la deformación en frío.

En la siguiente figura podemos apreciar como el acero más representativo de los aceros inoxidable austeníticos es el AISI 304, y que el AISI 316 es un derivado más resistente de éste. Para proporcionarle al acero AISI 316 esta resistencia extra se le añade Molibdeno (Mo) al AISI 304 obteniendo unas mejores propiedades, por lo que este acero será más caro.

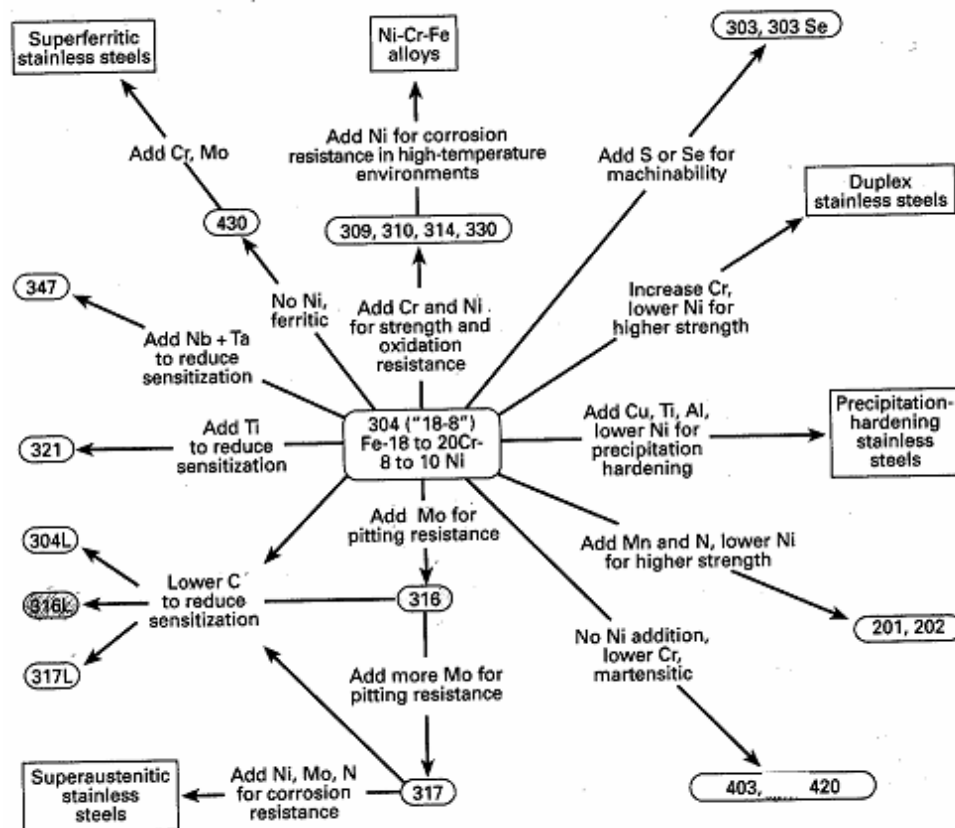


Figura 3: Relación del AISI 304 con los demás aceros inoxidables

1.3. Elementos Finitos

En todos los campos de la ingeniería existen multitud de problemas de los que no se puede hallar una solución analítica. La incapacidad de resolver estos problemas se debe a dos motivos, por un lado la complejidad del sistema nos impide conocer las ecuaciones diferenciales que lo definen y por otro las dificultades que surgen en el momento de definir las condiciones iniciales y las de contorno. Para poder trabajar con estos problemas hay que recurrir a los métodos numéricos, que nos dan una

aproximación del resultado. Estos métodos, a diferencia de los métodos analíticos con los que se puede obtener una solución exacta para cualquier punto de nuestro sistema, solamente proporcionan una solución aproximada para algunos puntos del sistema llamados nodos.

El método es aplicable a problemas en diversos campos: cálculo de estructuras, análisis tensional en sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de calor, etc.

En la actualidad este método es el que se utiliza con mayor frecuencia en los análisis numéricos, debido al enorme desarrollo que ha experimentado, unido a la capacidad de cálculo de los sistemas informáticos actuales.

El método de los elementos finitos (al igual que otros métodos de discretización, como el de las diferencias finitas) implica la división de un medio continuo por medio de volúmenes, áreas o líneas en un número concreto de elementos. Los distintos elementos se conectan entre sí por medio de un número finito de puntos que se denominan nodos.

Se deben establecer las funciones que gobiernan los desplazamientos y las temperaturas dentro de cada elemento finito, en función de los desplazamientos y temperaturas en los nodos del elemento. Estas funciones definirán el estado de deformación o los gradientes de temperatura dentro del elemento en función de los desplazamientos y temperaturas nodales, lo que junto con las propiedades termomecánicas del material y el estado inicial de partida permitirá obtener el estado térmico y tensional del elemento y de su contorno.

El método de los elementos finitos usa la formulación integral en lugar de las ecuaciones diferenciales para crear un sistema de ecuaciones algebraicas. Por otra parte se asume una función continua para representar la solución aproximada para cada elemento. La solución completa es generada al conectar o ensamblar las soluciones individuales permitiendo la continuidad en las fronteras entre elementos. Los pasos básicos a seguir para resolver un sistema de elementos finitos son los siguientes:

- Fase de preproceso

En esta fase lo primero que se debe definir es la geometría del modelo con el que vamos a trabajar, pudiendo ser éste axisimétrico, de tensión plana o de torsión. Posteriormente se constituye la malla de cálculo, es decir, se discretiza el dominio a resolver definiendo los elementos en que se divide el continuo y los nodos de conexión entre elementos; se deben definir las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de cada elemento; ensamblar los elementos para obtener la matriz global del sistema y por último aplicar las cargas, las condiciones iniciales y de contorno. Todos estos pasos se detallan a continuación en el apartado 2.1.

- Fase de resolución

En esta fase se resuelve el sistema matricial planteado obteniendo así las soluciones para cada nodo del sistema. Para solucionar estas ecuaciones se deben procesar los datos introducidos en la fase de preprocesamiento, por lo que el hardware con el que contamos deberá dedicar un tiempo de entre 1 y 6 horas (en los ensayos realizados en el presente proyecto) para realizar todos los cálculos necesarios.

- Fase de post procesado

Finalmente entramos en la fase de post procesado para extraer la información, calculada por el sistema, que es necesaria para cada caso estudiado. Esta forma se puede extraer en forma de gráfico, de datos o de animación.

1.4. Objetivos del Proyecto

El objetivo del proyecto es la creación de un modelo de punzonado mediante elementos finitos que permita estudiar este proceso en aceros inoxidables, en concreto en acero AISI 316. Con este modelo ser capaces de optimizar el proceso de punzonado en función de la holgura macho-matriz, minimizando las fuerzas en el proceso y por lo tanto las tensiones en el utillaje.

1.5. Estructura del Proyecto

Para la consecución del objetivo que se persigue en este proyecto, citado anteriormente, se simulará el proceso de punzonado en un programa que trabaje con elementos finitos para obtener una solución numérica mediante el cálculo de las interacciones entre los nodos según las propiedades atribuidas a estos en un proceso inicial de definición de características del proceso. En el capítulo 2 se describe el proceso de creación del modelo de elementos finitos, por pasos, tal y como debe ir definiéndose en el programa en cuestión.

Se busca la mejor aproximación posible a la realidad de los resultados arrojados por el programa de simulación, por lo que habrá un apartado referente al proceso de optimización en el que se describen los diferentes errores que pueden producirse en los resultados, como solucionarlos y la importancia de éstos en la solución final.

Para comprobar la aproximación adecuada de nuestros resultados a la realidad haremos una comparación con datos experimentales ofrecidos por documentos científicos, adjuntos, que tratan sobre el proceso de punzonado de chapa de acero inoxidable.

El primer estudio que realizaremos, mostrado en el capítulo 3, será la obtención de una holgura óptima entre el macho y la matriz que nos permita minimizar las fuerzas que entran en juego en el proceso de punzonado. Para hallar dicha holgura óptima estudiaremos punzonados de diferentes espesores de chapa (1,3 y 5mm) trabajando con diferentes holguras de tal forma que obtengamos una en la cual las fuerzas ejercidas por el punzón sean mínimas. Analizaremos también las rebabas, el perfil de corte y el inicio de la fractura, en función de las diferentes holguras, para tener en cuenta los efectos derivados de la imposición de una holgura para la cual las fuerzas se minimizan.

Una vez obtenida una holgura óptima utilizaremos ésta para estudiar el proceso de desgaste del utillaje contemplando diferentes aspectos en los que influye. Analizaremos

la evolución de las fuerzas máximas del proceso, altura de rebabas, inicio de la fractura y tensiones en el utillaje. Todo esto se muestra en el capítulo 4.

En el capítulo 5 se muestran las conclusiones obtenidas de los diferentes estudios realizados. En el capítulo 6 se exponen posibles vías de estudio que se pueden seguir para completar nuestro análisis. En un último capítulo se muestran los anexos a los que nuestro proyecto hace referencia en los diferentes capítulos.

2. Modelo de Elementos Finitos

El programa que utilizaremos para crear nuestro modelo de elementos finitos será el DEFORMTM - 2D V8.1. En este programa implementaremos un modelo de punzonado cuyo procesamiento nos aportará todo tipo de datos que necesitaremos para realizar nuestro posterior estudio.

2.1. Constitución del Modelo

Trabajaremos con un modelo axisimétrico ya que los punzones que se utilizarán serán de geometría cilíndrica y de frente plano, por lo que nuestro modelo será simétrico y de revolución. Según este tipo de geometría bastará con dibujar una sección de nuestro modelo de punzonado en el primer y cuarto cuadrante para que al revolucionarlo en torno al eje de simetría se extrapolen los datos a todo el conjunto.

2.1.1. Elementos que constituyen el modelo

Los elementos con los que crearemos el modelo serán tres: un punzón, un disco de chapa y una matriz.

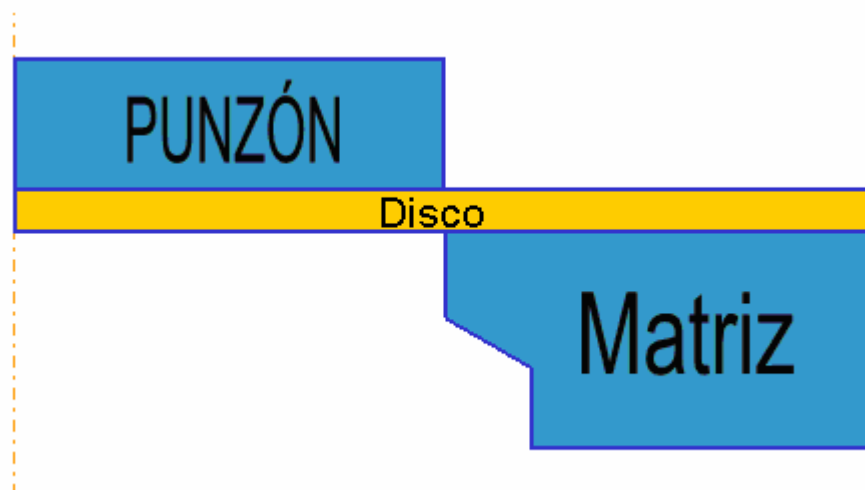


Figura 4: Elementos del modelo

Estos tres elementos estarán dispuestos tal como los muestra la figura 4 de tal forma que el punzón, en su movimiento a lo largo del eje vertical, corte la chapa que está sujeta por la matriz.

Para evitar que la parte del fleje que no está pisada por el punzón se levante por la acción del mismo, se impondrá una condición de contorno en esa zona de modo que el movimiento vertical esté impedido. Esta condición de contorno desempeñará la misma función que un sujetachapas.

Describiremos a continuación las diferentes propiedades que tendrá cada uno de los tres elementos que componen nuestro modelo.

2.1.2. Geometría

El punzón será concebido como cilíndrico, por lo que la geometría que introduciremos en el programa será un rectángulo, por ser esta la sección del mismo. En principio las aristas del punzón las consideraremos ideales (aristas vivas), aunque para determinados ensayos esta propiedad será modificada para simular el desgaste de la herramienta. El radio del punzón vendrá dado en función de la holgura con la que queramos trabajar en cada caso.

La chapa será considerada como un disco de un determinado espesor, ya que de este modo podremos implementarlo en una simetría axisimétrica. El diámetro del disco será notablemente mayor que el del punzón para que éste pueda ser sujetado contra la matriz, y no tengamos problemas derivados de la intrusión de la totalidad del fleje en el interior del utillaje. Trabajaremos fundamentalmente con espesores de 1, 3 y 5mm ya que es muy frecuente encontrar, en la industria, chapas con grosores contenidos en ese intervalo.

La matriz tendrá un agujero cilíndrico de radio nominal igual al del punzón, aunque el radio real de este sea otro dependiendo de la holgura proporcionada. Tendrá una primera parte cilíndrica para producir el corte en el fleje de forma que se respete el radio

requerido, y una segunda parte cónica para facilitar la caída de las pepitas tras el almacenamiento de dos o tres en la zona previa.

2.1.3. Materiales

En el caso del fleje consideramos que el material trabaja básicamente en la zona plástica debido a que en una operación de punzonado la zona elástica se rebasa rápidamente a lo largo del proceso. Utilizaremos por lo tanto un modelo plástico para simular el comportamiento del material del fleje.

El material que utilizaremos en el fleje será un acero inoxidable austenítico denominado AISI 316 que tiene las siguientes propiedades:

- Acero Inoxidable Austenítico AISI 316 (Fe/Cr18/Ni10/Mo3)

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se añade molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros. El bajo contenido en carbono de la aleación 316L otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

Propiedades Físicas	
Densidad (g cm^{-3})	7,96
Punto de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1370-1400
Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de Poisson	0,3
Dureza Brinell	160-190
Módulo de Elasticidad (GPa)	190-210
Resistencia a la Tracción (MPa)	1140

Tabla 1: Propiedades del acero AISI 316

En el caso del utillaje lo consideraremos como un modelo rígido en la mayoría de los casos, debido a que la rigidez del fleje en comparación con la del utillaje es despreciable, por lo que las deformaciones producidas en él serán mínimas. Para el análisis de tensiones internas en el utillaje, sin embargo, utilizaremos un modelo elástico ya que no se espera deformación plástica en él.

El material utilizado en el utillaje (elementos de corte: machos y matrices) para aquellos modelos en los que no sea considerado como rígido, será un acero con alto contenido en carbono y cromo denominado AISI D2. Este tipo de acero está especialmente indicado para punzonados

- **Acero AISI D2 (C1,55/Cr11,8/Mn0,4/Mo0,8/Si0,3/0,8V)**

Propiedades Físicas	
Densidad (g cm^{-3})	7,67
Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de Poisson	0,3
Dureza Brinell	210
Módulo de Elasticidad (GPa)	210
Resistencia a la Tracción (MPa)	1.320

Tabla 2: Propiedades del acero AISI D2

2.1.4. Mallado

Para producir un mallado que se adapte a nuestras necesidades debemos tener en cuenta la holgura con la que estamos trabajando para poder así determinar el tamaño de los elementos que componen la malla. También debemos tener en cuenta que el criterio de fractura de nuestro programa se basa en la eliminación en el cálculo, de elementos que alcanzan determinados valores en sus características mecánicas, según un cierto criterio previamente establecido. Por lo que cuanto más pequeños sean éstos, menor será su afectación al resultado.

Para evitar tener que crear muchos elementos, debido a que estos deben ser muy pequeños, y que el procesamiento del modelo sea muy largo concentraremos los

elementos en las zonas de interés, es decir, en aquellas en las que las tensiones y deformaciones sean máximas (zona de corte). De esta forma las zonas menos solicitadas quedarán con un mallado más basto y la zona de corte con un mallado más fino, evitando así utilizar un número elevado de elementos (ver figura 5).

Para conseguir la concentración de los elementos en las zonas deseadas utilizaremos un sistema de “ventanas” que nos ofrece el DEFORM, consistente en el posicionamiento de ventanas, en las cuales el mallado tiene unas características determinadas. En aquellas zonas del modelo donde se encuentren estas ventanas el mallado tendrá las características especificadas propias de cada ventana.

El numero de elementos utilizados en los diferentes modelos va entre 1.000 y 10.000 en función del volumen que necesitemos mallar. Las zonas de concentración de elementos tienen una densidad de mallado 50 veces superior a la de las zonas de menor concentración. Para comprobar que la densidad de mallado es aceptable para cada modelo haremos diferentes pruebas para comprobar que a partir de una densidad mínima los datos arrojados por el programa son constantes.

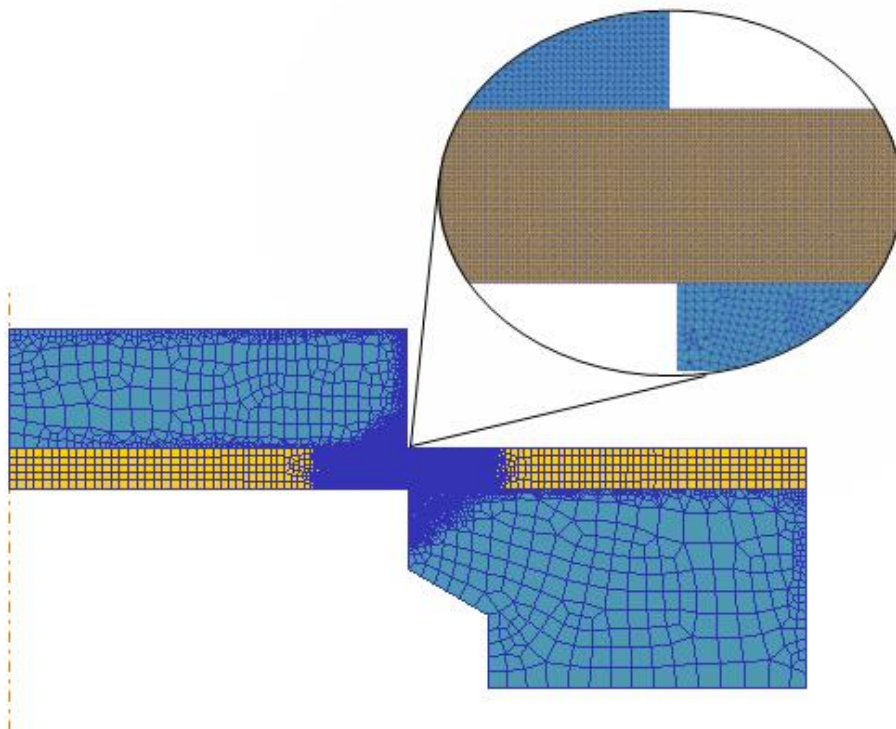


Figura 5: Mallado

2.1.5. Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno que aplicaremos serán las siguientes:

- En el fleje impediremos el movimiento vertical en la zona no pisada por el punzón de forma que simule la acción de un sujetachapas.
- En el punzón impondremos una condición de contorno, solo en el caso de estar mallado (para utillaje rígido no es necesario), consistente en que la parte superior se mueva de acuerdo al movimiento especificado de 200 mm/s a lo largo del eje $-Y$. Imponiendo esta condición sólo en la parte superior del punzón lograremos que la parte inferior se deforme según las características del material utilizado.
- En la matriz la condición de contorno impuesta, también en el caso de estar mallada, será el impedimento del movimiento vertical de la parte inferior dejando que la parte superior se deforme en función de las características del material.

2.1.6. Rozamientos

Los rozamientos que utilizaremos serán del tipo maestro-esclavo de tal forma que el fleje sea el esclavo ya que será éste el que se mueva respecto al utillaje.

Utilizaremos un modelo de rozamiento del tipo Shear y Coulomb para la relación punzón-chapa y matriz-chapa respectivamente. El valor del coeficiente de rozamiento será de 0,12 ya que es el recomendado por DEFORM para utillaje de acero.

2.1.7. Criterio de Rotura

El método utilizado por DEFORM para simular la rotura del material es la eliminación de elementos en el cálculo, que hayan sobrepasado un límite de tensión crítico que viene determinado por las propiedades del material.

El criterio que utiliza el programa para calcular la tensión límite que provocará la eliminación en el cálculo de elementos es el método Cockroft & Latham que considera que el material se fractura cuando la tensión máxima principal (σ_1) es mayor que el límite de rotura.

El método Cockroft & Latham se usa habitualmente para el proceso de punzonado. Este criterio es más cercano a la realidad para holguras amplias que para holguras mínimas, como se aprecia en el gráfico adjunto.

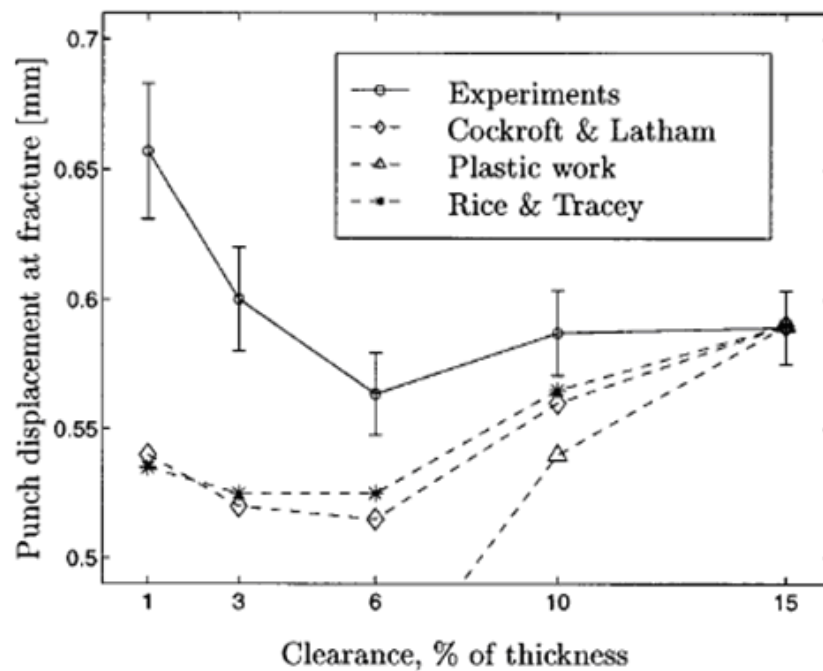


Figura 6: Desplazamiento a Fractura Según Diferentes Criterios

Para indicarle al DEFORM que el material debe fracturarse y no sólo deformarse debemos introducir un número de pasos transcurridos los cuales el procesamiento debe parar para eliminar los elementos que hayan sobrepasado la tensión crítica. Debemos introducir también el número de elementos que tienen que haber sobrepasado dicha tensión límite para que se produzca la eliminación de los mismos. En nuestros casos pondremos entre 5 y 8 pasos como intervalo de parada para producir la eliminación de elementos, este número viene dado en función del avance del punzón por paso en cada caso. El número mínimo de elementos que deben haber sobrepasado el límite de tensión lo fijaremos en 1 para que el corte sea más continuo ya que con que un solo elemento haya sobrepasado el límite este ya será eliminado.

2.1.8. Otros parámetros a tener en cuenta

Para completar la creación del modelo debemos tener en cuenta unos cuantos parámetros más relativos al funcionamiento general del mecanismo de punzonado y a requerimientos del programa para su buen funcionamiento:

- Temperatura de trabajo 20° C. No consideraremos el aumento de temperatura producido en la zona de corte, por lo que trabajaremos con el modo de deformación en frío.
- El avance del punzón en cada paso será de 0,05 mm, y la carrera total del punzón será aproximadamente el doble o el triple del espesor de la chapa.
- Fijaremos el número de pasos en torno a 70 ya que por recomendación del programa este es un número adecuado para un proceso de punzonado.

2.2. Resultados y Optimizaciones

Una vez construido nuestro modelo de elementos finitos en el programa DEFORM 2D debemos crear una base de datos que posteriormente el programa deberá procesar para calcular todos los datos que influyen en el proceso a lo largo del mismo.

El programa puede dar ciertos errores en su procesamiento normalmente relacionados con el mallado, ya que este debe ir adaptándose a una simetría cada vez más complicada debido al estrechamiento que se produce durante el corte.

El procedimiento que sigue el programa cuando el mallado sobrepasa los límites geométricos establecidos en el pre-procesamiento es crear una nueva malla adaptada a la nueva geometría requerida. Si en un paso posterior a un remallado es necesario otro remallado y el programa no es capaz de producir una malla diferente al paso anterior se detendrá la simulación y nos informará de la causa. Esto es debido a que la necesidad de borrar elementos del cálculo, por haber excesivo volumen de material, ha tenido lugar

antes de un paso en el que esté prevista esta eliminación. Para solucionar este problema deberemos volver al pre-procesador unos pasos atrás e imponer otro intervalo de pasos en los que se produce la eliminación de elementos por haber sobrepasado el límite crítico de rotura. Debemos poner un intervalo menor que el anterior, ya que al final del recorrido es necesario eliminar elementos del cálculo más frecuentemente. El programa quedará optimizado en cuanto a fractura se refiere si en los primeros pasos el intervalo de corte es mayor y en los últimos menor, ya que de esta forma se simula más fielmente el comportamiento real.

Los resultados del procesamiento del problema los podemos ver en el post-procesamiento. En esta opción podemos extraer gráficos de la evolución de diferentes variables como la fuerza, velocidad, etc.

Al analizar la simulación en el post-procesador podemos encontrarnos con que los elementos de la malla son demasiado grandes comparados con la holgura del problema en cuestión, por lo que no cabrán en el espacio entre el punzón y la matriz. Ante esta situación debemos volver al pre-procesador, disminuir el tamaño de los elementos que componen la malla y volver a procesar todo el programa para que este nos entregue datos más fiables.

Otro problema que podemos detectar en el post-procesador es que la chapa se estira mucho antes de producirse la eliminación de elementos del cálculo que hayan sobrepasado el límite de rotura. Este problema se debe a haber elegido un intervalo muy grande de pasos para que se produzca la fractura, por lo que deberemos volver al pre-procesador para disminuir este intervalo y volver a procesar el problema, aunque esta vez sólo será necesario procesar desde el paso en el que se detectó el inicio del problema.

2.3. Validación del Modelo

Para validar nuestro modelo de elementos finitos lo compararemos con modelos experimentales expuestos en artículos relacionados con el punzonado. En concreto

utilizaremos un artículo titulado: *Aspectos analíticos y tecnológicos del proceso de punzonado de chapa* (Anexo I).

En este artículo se propone un modelo, que nosotros vamos a procurar implementar fielmente en nuestro programa, para comprobar si nuestros datos coinciden con los expuestos en el artículo. En el artículo se consideran las diferentes fuerzas ejercidas por el punzón en función de la holgura macho-matriz que imponamos. Compararemos aspectos tanto geométricos como numéricos.

Modelo propuesto por el artículo:

Se utilizará un punzón de 10mm de diámetro que corta una chapa de acero inoxidable (sin especificar) con un espesor de 2,8mm. Con estos datos ya podemos construir un modelo muy similar al utilizado en el artículo.

La implementación del modelo propuesto en el artículo en el programa DEFORM quedará de la siguiente manera:

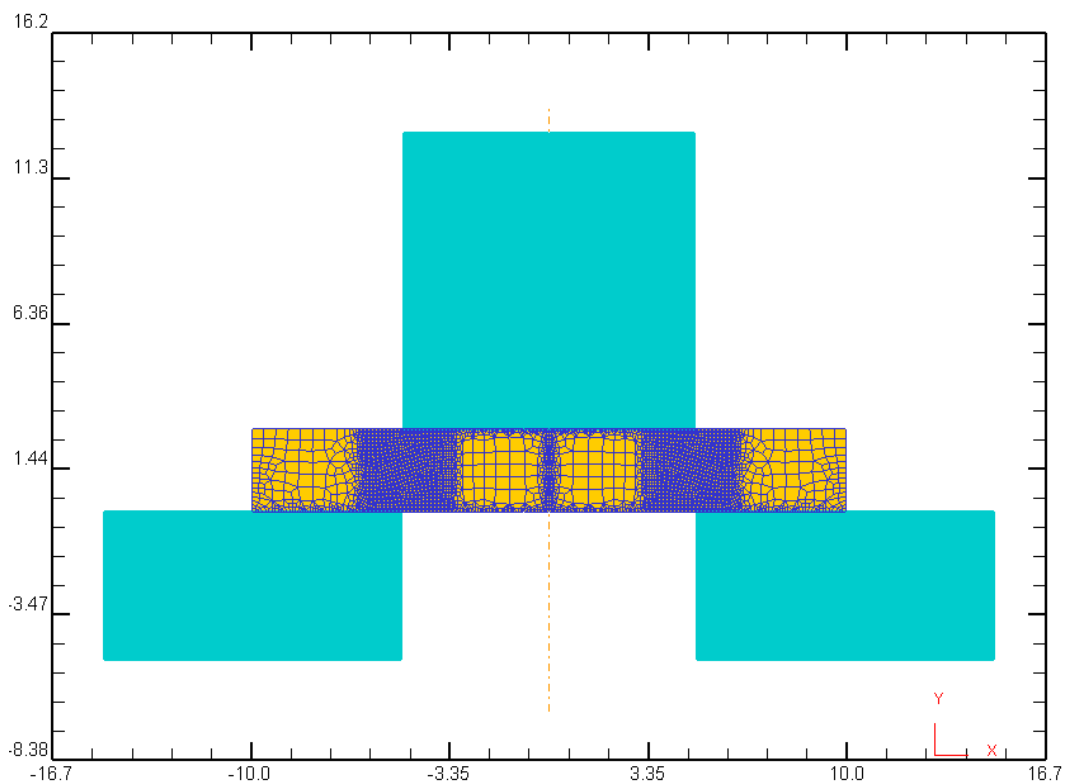


Figura 7: Modelo de Validación

En la figura 7 se muestra una sección del modelo implementado propuesto por el artículo que estamos utilizando como referencia. En este modelo hemos utilizado las características anteriormente descritas para la configuración del problema. Observamos que la única parte mallada es el fleje, ya que para el estudio que vamos a realizar será suficiente.

2.3.1. Similitud Geométrica

En esta parte de la validación del modelo se pretende comparar el parecido de la geometría de ambos modelos para poder hacer una valoración cualitativa de la similitud existente entre ambos.

- Etapas del Punzonado

En el gráfico que se muestra a continuación se aprecian las diferentes etapas del proceso de punzonado. Estas etapas están reproducidas en nuestro modelo expuesto a continuación.

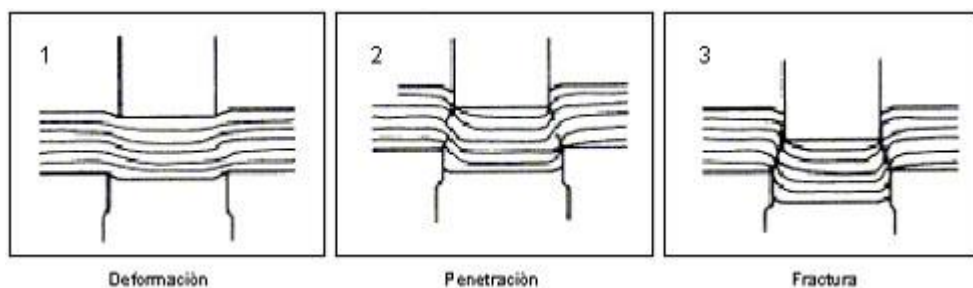


Figura 8: Etapas del punzonado

Reproducción de las etapas en nuestro modelo:

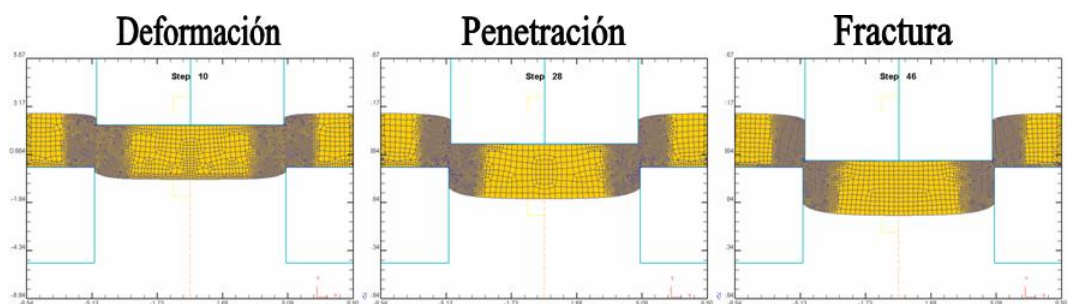


Figura 9: Etapas de corte en nuestro modelo

1. Deformación: los esfuerzos del punzón sobre la chapa metálica, originan en ésta una deformación, inicialmente elástica y después plástica, alrededor de los bordes del punzón y matriz.

2. Penetración: los filos de corte del punzón y matriz penetran dentro del material, produciéndose grietas en el material debido a la concentración de tensiones a lo largo de los filos de corte.

3. Fractura: las grietas originadas a uno y otro lado de la chapa se encuentran, originando la separación del material. Asimismo, el punzón continúa su descenso para expulsar el recorte. El juego de corte J , permite la penetración del punzón en la matriz y la expulsión del material cortado.

Podemos observar que nuestro modelo emula muy fielmente las diferentes etapas de penetración del punzón en el fleje.

- Zonas del Borde de Corte

Analizaremos a continuación la similitud existente entre las zonas del borde de corte entre el modelo propuesto por el artículo y el nuestro.

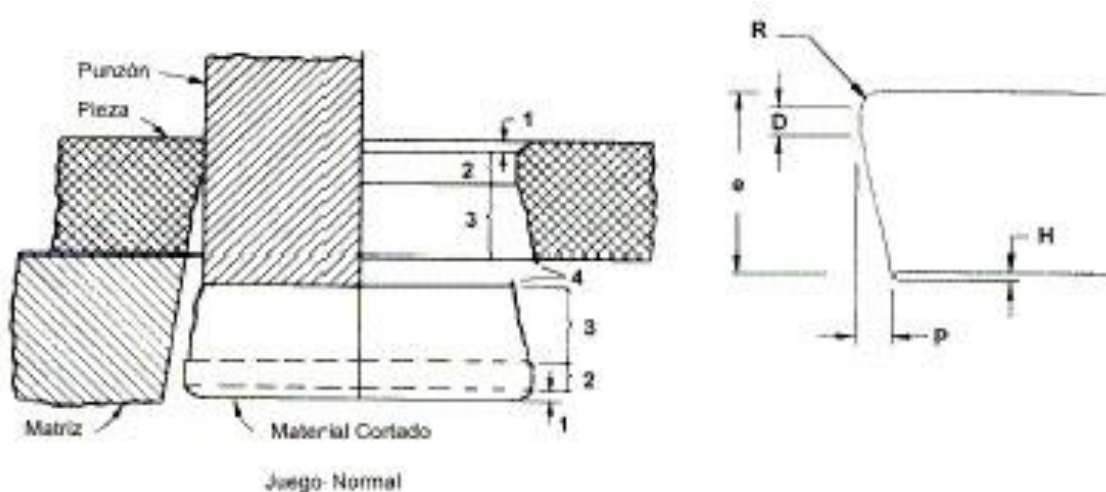


Figura 10: Zonas del borde de corte

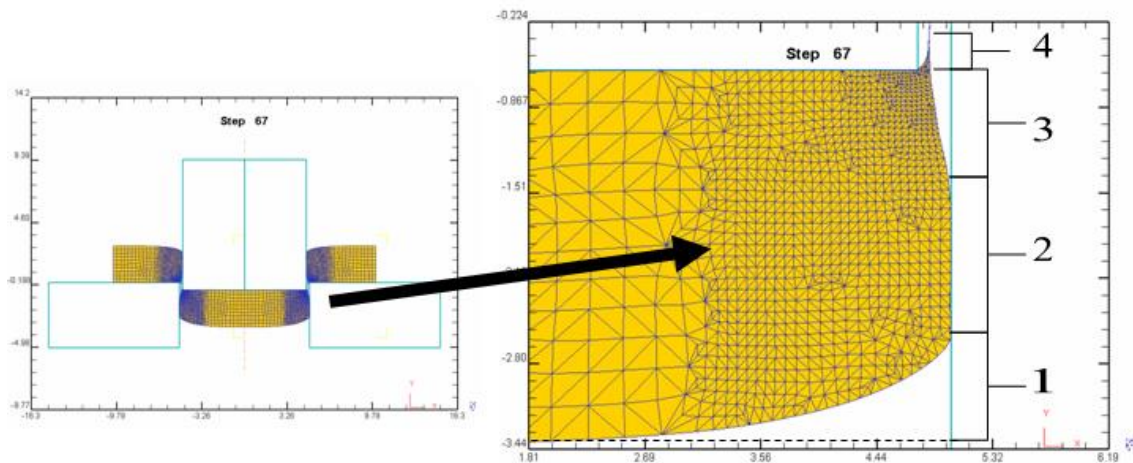


Figura 11: Zonas del borde de corte en nuestro modelo

1. *Deformación plástica caracterizada por un radio R .*
2. *Zona bruñida de aspecto brillante caracterizada por el ancho D .*
3. *Fractura angular, con aspecto mate, definida por la penetración P .*
4. *Rebaba caracterizada por su altura H .*

Podemos comprobar tras la comparación geométrica que el modelo que hemos implementado se asemeja al modelo propuesto en el artículo al que nos estamos refiriendo. Apreciamos como el DEFORM es capaz de simular los perfiles de corte que se producen tras el punzonado de la chapa, así como las deformaciones plásticas producidas en la parte del fleje que ha quedado agujereada.

Tras la comparación cualitativa de nuestro modelo con el propuesto en el artículo podemos considerar válido el implementado en DEFORM, ya que es capaz de reproducir las deformaciones producidas en el proceso.

2.3.2. Similitud Numérica

El criterio de semejanza que utilizaremos será la fuerza máxima ejercida por el punzón en su recorrido. En función de esta fuerza máxima en función de la holgura que tengamos en cada caso podemos determinar cual será el juego óptimo en el que la fuerza será mínima. En el artículo se muestra como la fuerza mínima se da para una holgura relativa de aproximadamente el 10%, es decir la correspondiente al segundo ensayo de los que se muestran a continuación.

Ensayo 1: J = 0,25 mm**- Datos del ensayo**

Diámetro del punzón (mm)	10
Espesor de la chapa (mm)	2,8
Holgura radial (mm)	0,25
Holgura diametral relativa al espesor de la chapa	17,8%
Material	Acero
Resistencia a tracción del acero utilizado (Kg/mm²)	56,35
Fuerza máxima en el artículo (N)	24.000
Fuerza máxima en DEFORM (N)	23.700
Error (%)	1,3

Tabla 3: Datos del Ensayo 1

Vemos en los datos de este primer ensayo que los valores que nos entrega el programa DEFORM tienen un error relativo del 1,3% respecto al valor obtenido del artículo. Este error puede considerarse aceptable como para afirmar que nuestro modelo de punzonado guarda gran similitud con la realidad de los ensayos mostrados en el artículo en cuestión. Comprobaremos si este error se mantiene para diferentes holguras.

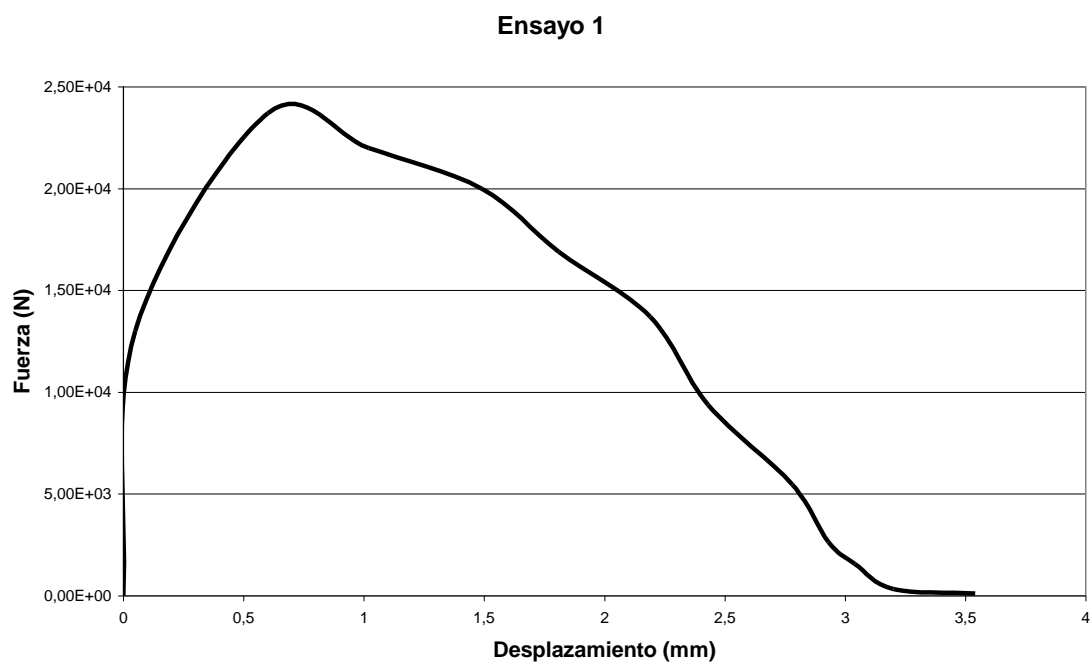
- Diagrama de Fuerza-Desplazamiento

Figura 12: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del punzón del Ensayo 1

Ensayo 2: J = 0,15 mm**- Datos del ensayo**

Diámetro del punzón (mm)	10
Espesor de la chapa (mm)	2,8
Holgura radial (mm)	0,15
Porcentaje respecto a chapa	10,7 %
Material	Acero
Resistencia a tracción del acero utilizado (Kg/mm²)	56,35
Fuerza máxima en el artículo (N)	23.750
Fuerza máxima en DEFORM (N)	23.300
Error (%)	1,9

Tabla 4: Datos del Ensayo 2

En este segundo ensayo podemos comprobar como se mantiene el error relativo, por lo que también lo podemos dar por válido. Haremos, sin embargo, otro ensayo más para que nuestro modelo quede totalmente validado para un rango aceptable de holguras.

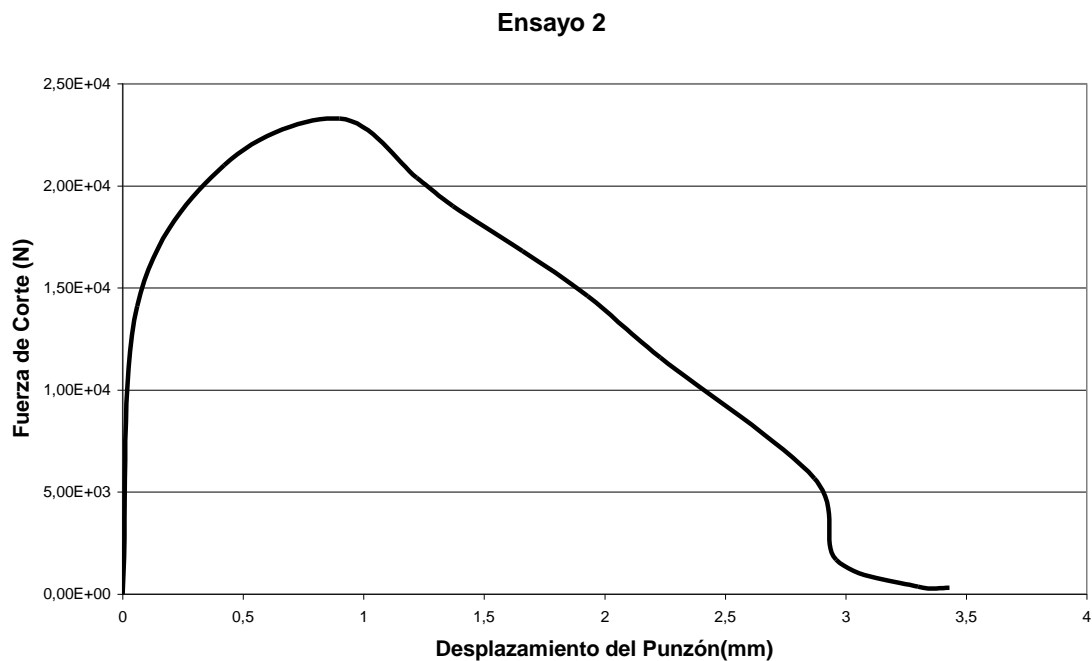
- Diagrama de Fuerza-Desplazamiento según DEFORM

Figura 13: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del punzón del Ensayo 2

Ensayo 3: J = 0,06 mm**- Datos del ensayo**

Diámetro del punzón (mm)	10
Espesor de la chapa (mm)	2,8
Holgura radial (mm)	0,06
Porcentaje respecto a chapa	4,28 %
Material	Acero
Resistencia a tracción del acero utilizado (Kg/mm²)	56,35
Fuerza máxima en el artículo (N)	25.000
Fuerza máxima en DEFORM (N)	24.300
Error (%)	2,9

Tabla 5: Datos del Ensayo 3

En este tercer caso apreciamos como el error se ha incrementado pero sigue sin ser relevante. Comprobamos también como la fuerza máxima ejercida por el punzón es mayor que en los otros dos casos.

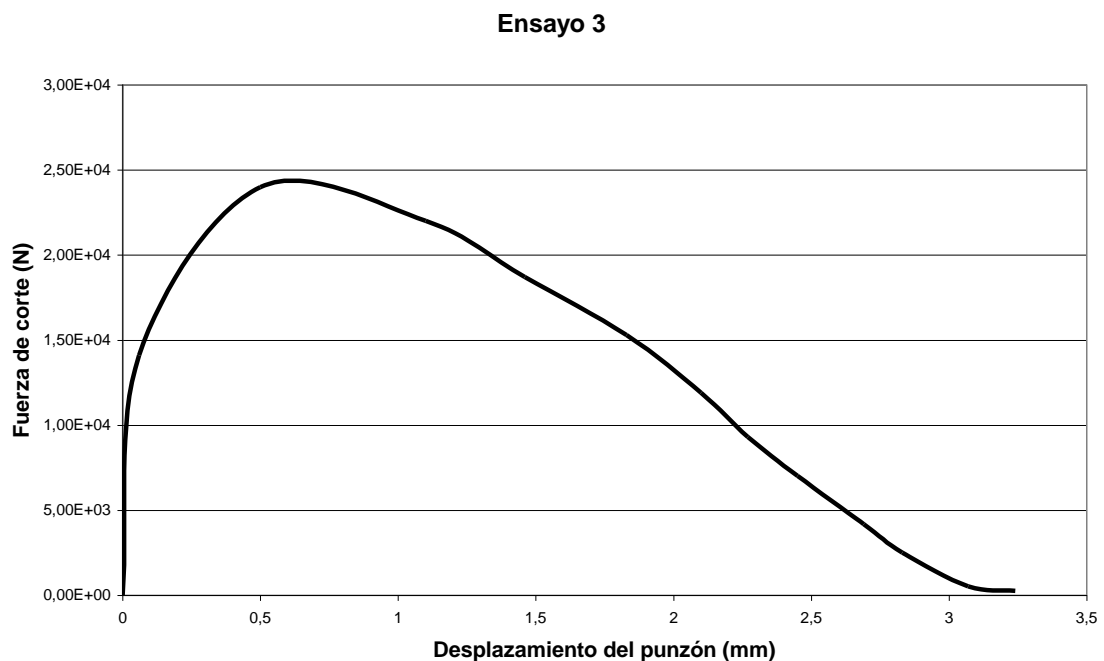
- Diagrama de Fuerza-Desplazamiento según DEFORM

Figura 14: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del punzón del Ensayo 3

Analizados los tres ensayos podemos concluir que nuestro modelo se aproxima de forma notable a la realidad, por lo que podemos dar este como válido y seguir analizando otros aspectos del punzonado basándonos en este modelo.

Comparación de ensayos

Comparamos ahora la evolución de la fuerza ejercida por el punzón a lo largo de la carrera de este. Vemos como efectivamente la fuerza mínima se da para la holgura del 10% tanto en nuestros ensayos como en los proporcionados por el artículo.

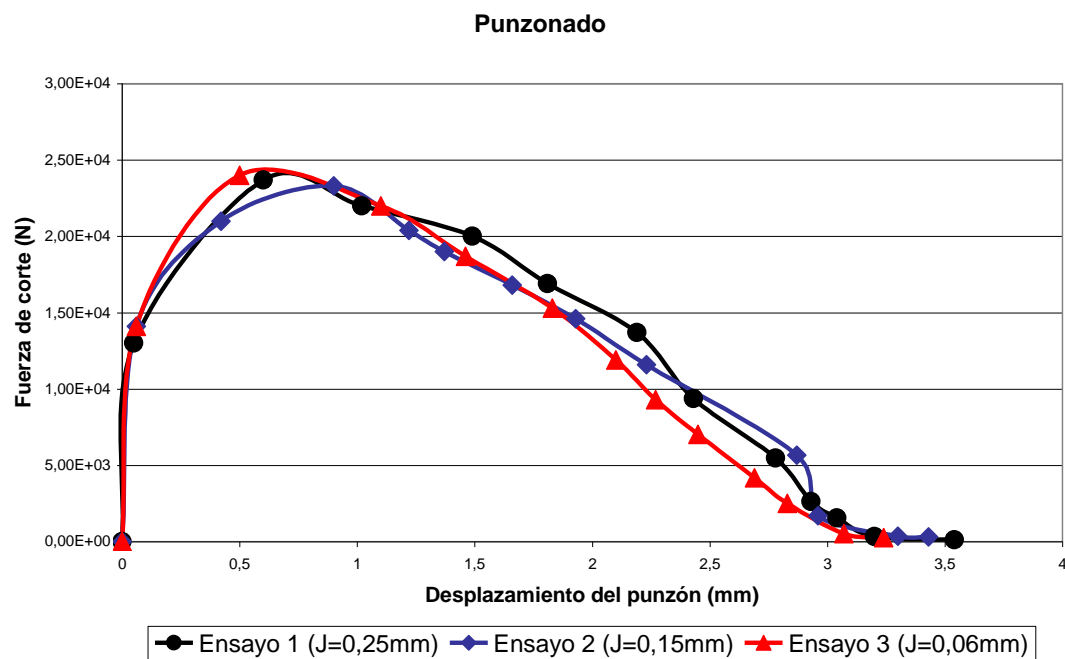


Figura 15: Fuerzas de punzonado (DEFORM)

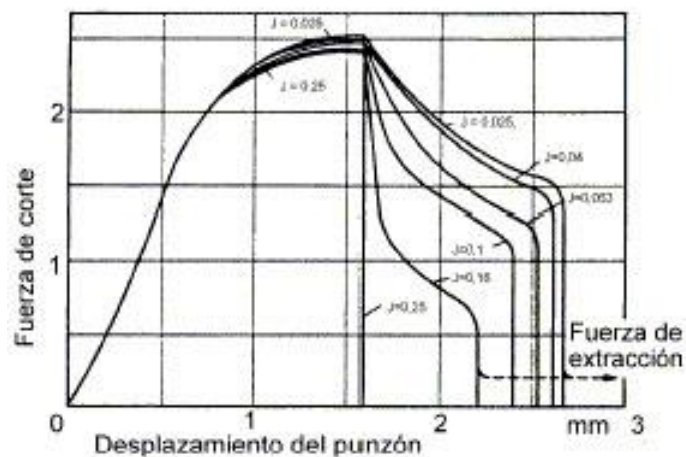


Figura 16: Fuerzas de punzonado según el artículo

Comparando los dos gráficos vemos que ambos coinciden en la primera etapa del corte consistente en una fuerte subida de la fuerza hasta un máximo donde se produce la fractura. En la segunda etapa del corte los gráficos son más dispares, esto es debido a las diferentes fuerzas de extracción que vienen dadas en función del rozamiento que se produzca con las paredes de la matriz, y ya que en el documento no se especifica que rozamiento se ha utilizado para realizar los ensayos, nosotros sólo podemos encontrar una aproximación, por lo que los gráficos se diferenciarán más en esta zona.

Según diferentes fuentes podemos comparar los datos que nos proporciona el DEFORM con datos obtenidos de la siguiente expresión analítica del proceso:

$$F_{m\acute{a}x} = \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot e$$

Esta expresión surge del mismo concepto de tensión en la que se considera que la fuerza es igual al producto de una tensión, de cizalladura en este caso, por una superficie de corte que en este caso es el perímetro del punzón por el espesor de la chapa.

En la información acerca del punzonado expuesta en el apartado de introducción se utiliza una fuerza de cizalladura correspondiente al 80% de la resistencia última a tracción, en cambio en otras fuentes se considera que la resistencia a cizalladura es la mitad que la de tracción, por lo que compararemos la afinidad de los datos con los dos criterios para determinar cual es el más apropiado a nuestro caso.

Ensayos	Resistencia Tracción (kg/mm ²)	Espesor (mm)	Holgura (%)	Radio (mm)	Fuerza DEFORM (N)	$\tau = 0,5 \cdot \sigma_{ut}$ (N)	Error (%)	$\tau = 0,8 \cdot \sigma_{ut}$ (N)	Error (%)
J=0,25mm	56,35	2,8	17,8	5	23700	23077,87	2,70	36924,59	35,82
J=0,15mm	56,35	2,8	10,7	5	23300	23560,72	1,11	37697,15	38,19
J=0,06mm	56,35	2,8	7,14	5	24300	23802,83	2,09	38084,52	36,19

Tabla 6: Cálculo de fuerzas.

Vemos como la consideración de que la resistencia última a cizalladura es el 50% de la de tracción es la que mejor se aproxima a los datos obtenidos con el DEFORM con

un error máximo del 2,7% en uno de los ensayos. Esta comprobación cuantitativa de los datos arrojados por el programa constata una vez más la validez del modelo creado.

Los errores obtenidos con la aproximación que toma la tensión de cizalladura como el 80% de la de tracción son demasiado grandes como para considerarla válida.

3. Análisis de Resultados

En este apartado trataremos de establecer cual es la relación existente entre la holgura macho-matriz y diferentes aspectos del punzonado como son la fuerza que ejerce el punzón sobre la chapa para producir el corte, la altura de la rebaba que queda tras el proceso, el perfil de corte resultante o el desplazamiento del punzón para el que se produce la fractura.

Para estudiar las relaciones descritas anteriormente crearemos un modelo muy similar al anterior variando únicamente su geometría. Este nuevo modelo constará de un punzón de 100mm de diámetro nominal, una chapa de acero inoxidable AISI 316 de grosores 1,3 y 5mm de geometría circular de 200mm de diámetro, una matriz con una zona cilíndrica y otra cónica para la expulsión de las piezas ya cortadas con mayor facilidad. La función del sujetachapas la simularemos con una condición de contorno que impedirá en movimiento de la chapa en el eje vertical como ya se ha dicho en la descripción del modelo.

Realizaremos un total de 21 ensayos diferentes para cubrir un rango de holguras relativas que van desde el 3% al 15% en chapas de espesores 1, 3 y 5mm. Des este modo podremos cubrir un rango bastante amplio como para obtener resultados fiables.

En la figura 17 se muestra una sección del modelo que se utilizará para la realización de estos nuevos ensayos en los que obtendremos todos los datos necesarios para realizar una serie de estudios que se expondrán a continuación.

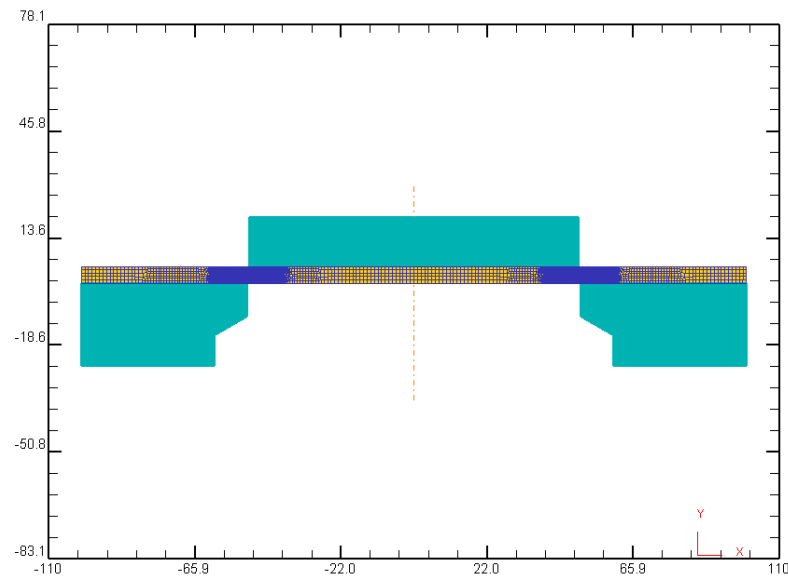


Figura 17: Modelo para el análisis de holguras

3.1. Fuerzas en Función de la Holgura

En este análisis se pretende establecer cual es la holgura óptima con la que debemos trabajar en un proceso de punzonado para que las fuerzas que intervienen sean mínimas. Para llegar a este resultado el criterio que se utilizará es el de fuerza máxima ejercida por el punzón, de tal forma que aquella holgura con la que menor fuerza deba ejercerse para cortar la chapa será la óptima.

Según el artículo mencionado en el apartado 2 (Anexo I) la holgura óptima será aquella en la que las fracturas que se produzcan desde el punzón y desde la matriz se lleguen a juntar en el medio produciéndose así un corte mucho más limpio y con menos esfuerzo. Si en vez de encontrarse las dos grietas éstas se cruzan, provocarán un corte secundario, lo que tendrá como consecuencia un perfil de corte imperfecto. El valor de holgura relativo optimo que indica en artículo es en torno al 10%.

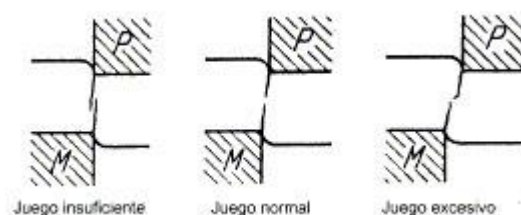


Figura 18: Posición relativa de las grietas según el juego

Los resultados de los ensayos realizados con el programa DEFORM arrojan los valores (expuestos en la tabla 7) de fuerzas máximas en función de las diferentes holguras y los diferentes espesores de chapa utilizados.

Espesores	Holguras	Fuerza Máxima (DEFORM) (N)
1 mm	3%	176.000
	6%	179.000
	8%	166.000
	9%	166.000
	10%	169.000
	12%	178.000
	15%	174.000
3 mm	3%	478.000
	6%	496.000
	8%	494.000
	9%	475.000
	10%	476.000
	12%	481.000
	15%	494.000
5 mm	3%	795.000
	6%	819.000
	8%	773.000
	9%	787.000
	10%	809.000
	12%	813.000
	15%	798.000

Tabla 7: Fuerzas Máximas

En primer lugar se realizaron los ensayos de 3, 6, 9, 12 y 15% para hacer un primer barrido de las holguras e inducir en qué porcentaje estaría la holgura óptima. Tras esta primera tanda de ensayos observamos que la mínima fuerza se producía en el 9% de holgura en los tres espesores de chapa.

Una vez localizada la mínima fuerza procedemos a un análisis más exhaustivo del entorno de holguras donde se encuentra ese valor mínimo para determinar de forma más precisa la holgura óptima.

Tras experimentar en torno al mínimo valor obtenido en los ensayos previos (con 8 y 10%) comprobamos que efectivamente el mínimo se encontraba en el 9% para las

chapas de espesores 1 y 3mm no siendo así para la chapa de espesor 5mm, ya que en este caso se produce en el 8% del espesor.

Mostramos a continuación las gráficas de las fuerzas ejercidas por el punzón en función de las holguras relativas para los tres espesores.

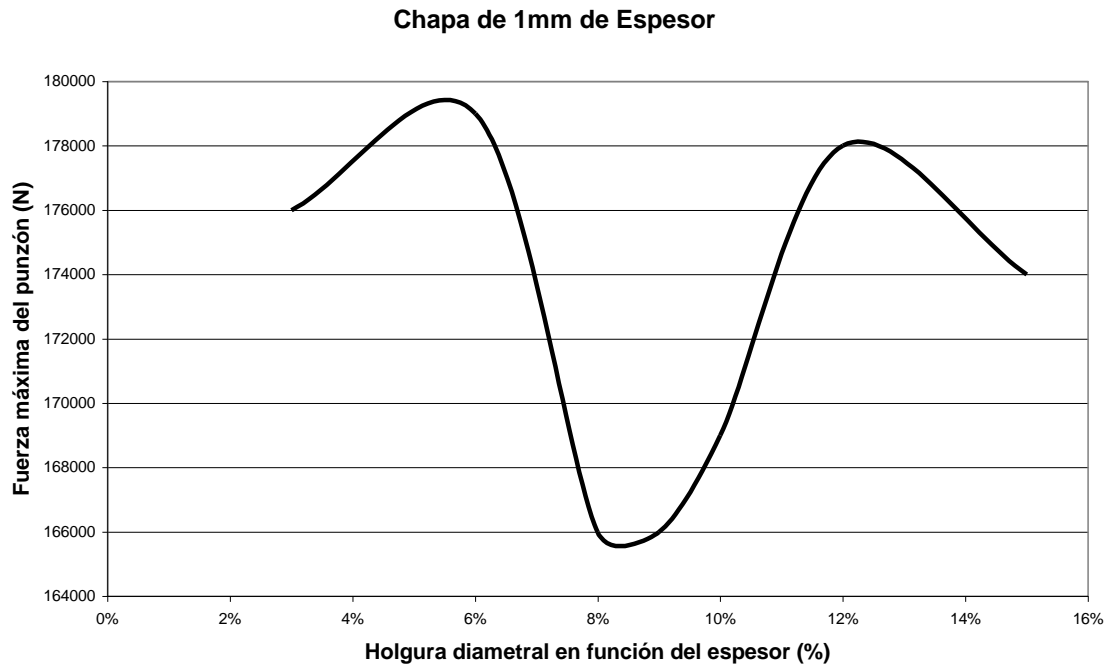


Figura 19: Fuerza mínima para chapa de 1mm

Vemos en la gráfica correspondiente a los valores máximos de fuerza ejercidos por el punzón en las diferentes holguras que la holgura en la que es necesaria la mínima fuerza para producir el corte de la chapa es el 9%. Este valor es notablemente menor que los inmediatamente más cercanos, aunque observamos que la fuerza máxima vuelve a ser menor en los valores de holgura extremos. Comprobamos como el valor del 9% es muy similar al propuesto por el artículo del anexo I (10%), esto nos indica que el valor es fiable.

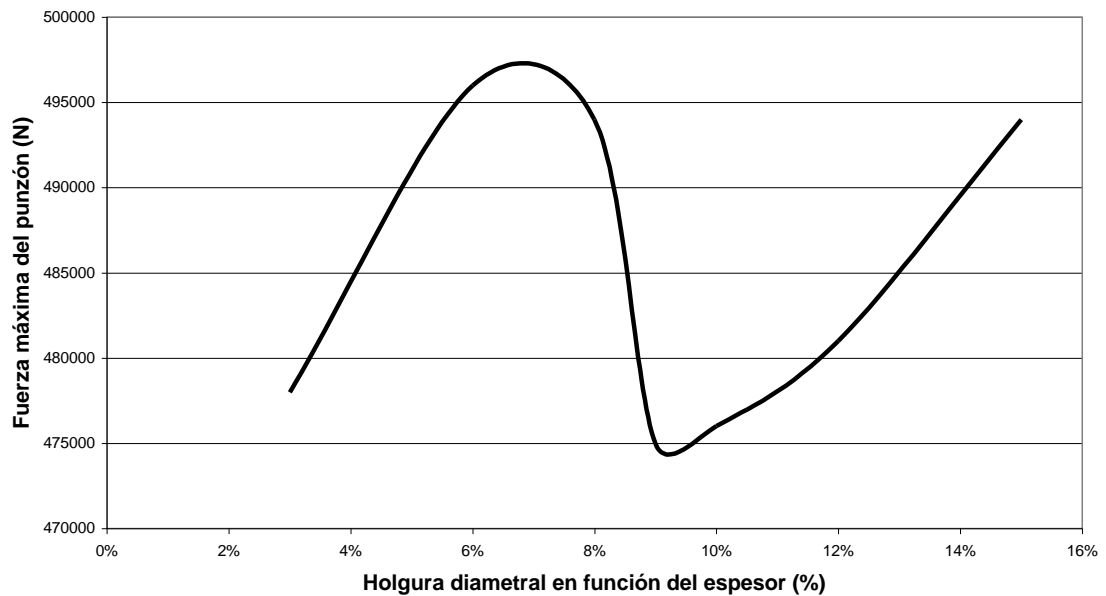
Chapa de 3 mm de Espesor

Figura 20: Fuerza mínima para chapa de 3mm

En el caso de la chapa de espesor 3mm el mínimo vuelve a estar en el 9% pero en este caso la diferencia respecto a otras holguras no es tan acusada. La evolución del gráfico es diferente que en los otros dos casos, ya que para el 15 % el valor de la fuerza máxima sigue creciendo. Como lo que interesa en este estudio es concluir una holgura óptima no estudiaremos el comportamiento del material en holguras que no sean esta.

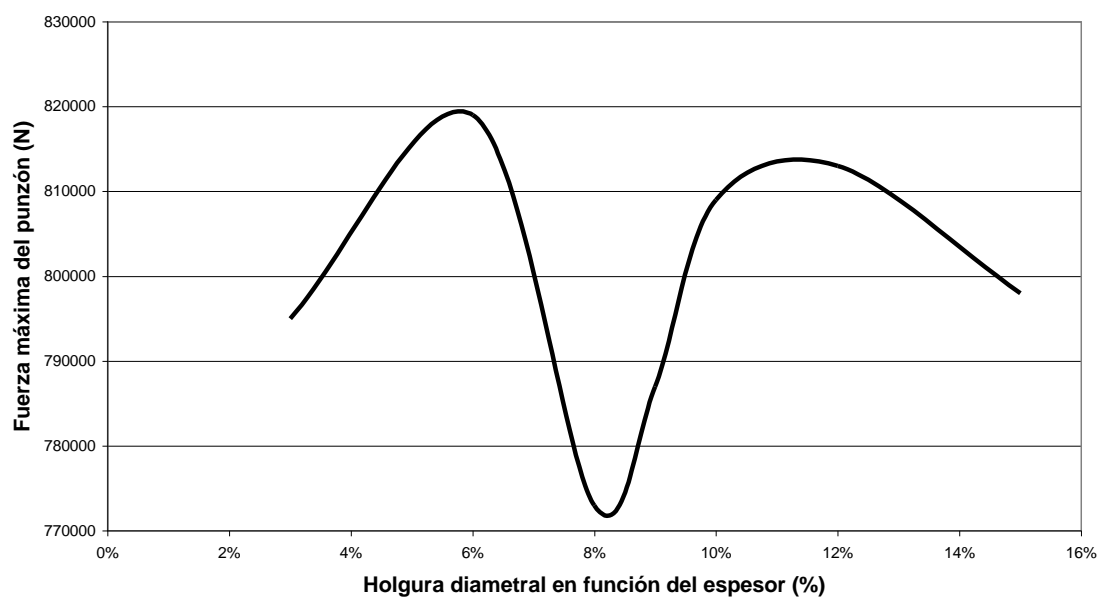
Chapa de 5 mm de Espesor

Figura 21: Fuerza mínima para chapa de 5mm

En la chapa de espesor 5mm apreciamos también una fuerte bajada en el 8% y vemos como esta gráfica guarda mucha semejanza con la de la chapa de espesor 1mm, por lo que podemos considerar que el comportamiento seguido por chapas entre 1 y 5mm de espesor será muy similar.

- Conclusiones

Como ya predecía el artículo estudiado en el apartado 2 (Anexo I) la holgura óptima estará cerca del 10% en espesores del 3 al 5% por lo menos, ya que no podemos afirmar que esto ocurra fuera de este rango debido a que no es objeto de estudio de este proyecto.

Al encontrarnos con que en los tres casos la holgura óptima se encuentra en torno al 9% del espesor podríamos extrapolar estos resultados para todas aquellas chapas de acero inoxidable austenítico con espesores comprendidos entre 1 y 5mm.

Si optimizamos un proceso de punzonado de tal forma que las fuerzas que se ejerzan sean las mínimas podremos obtener un importante ahorro energético y económico ya que además de ahorrar energía la fuerza influye en el proceso de desgaste de las herramientas utilizadas.

Es interesante también estudiar el acabado de la pieza en función de la holgura utilizada, ya que puede que la holgura en la que se produce la fuerza mínima no corresponda con el acabado óptimo de la pieza, por ello se deben valorar los diferentes aspectos en función de la importancia que tengan en nuestro proceso productivo.

3.2. Rebabas en Función de la Holgura

Procedemos ahora al estudio de la altura de las rebabas en función de la holgura que impongamos entre el macho y la matriz. La rebaba óptima no tiene por que coincidir con la holgura con la que menos fuerza ejercemos, por lo que en función de nuestras necesidades a la hora de producir podremos adaptar la holgura a lo que más convenga.

El modelo que utilizaremos para analizar la altura de las rebabas será el mismo que el utilizado en el apartado anterior. Para comprobar que este modelo atiende a la realidad compararemos nuestro estudio con el artículo: *Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network* (Anexo II).

Una vez más haremos un barrido desde holguras del 3% al 15% en los tres espesores de chapa anteriormente utilizados (1,3 y 5mm). De este modo tendremos un campo suficientemente amplio como para sacar conclusiones válidas.

A continuación se muestra un ejemplo de rebaba sacado de nuestro modelo, para comprobar que la simulación en DEFORM es acertada ya que emula el perfil de corte tal y como podemos encontrarlo en la realidad.

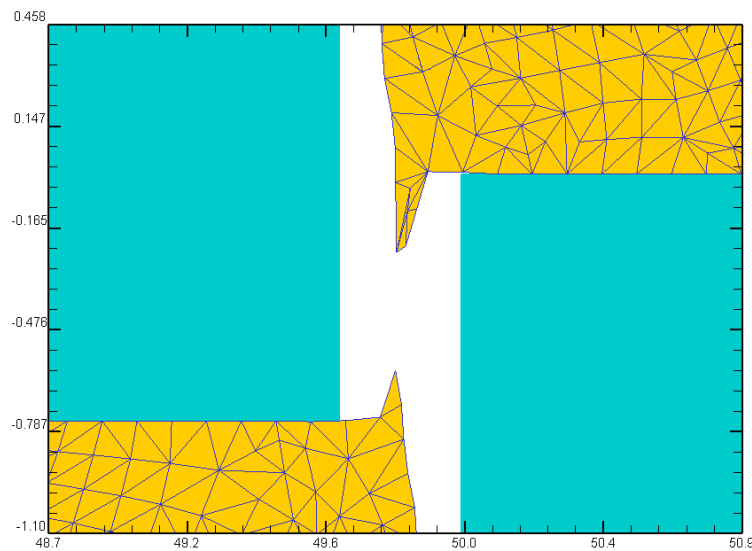


Figura 22: Detalle de la rebaba

El procedimiento que seguimos para extraer las medidas de las diferentes rebabas es la utilización de una herramienta de medida que nos ofrece el DEFORM con la que mediremos las alturas de rebaba en los diferentes ensayos para posteriormente elaborar una gráfica en la que se pueda apreciar la evolución de las alturas porcentuales en virtud de las holguras relativas en los diferentes espesores de chapa.

Mostramos el gráfico resultado de la extracción de datos:

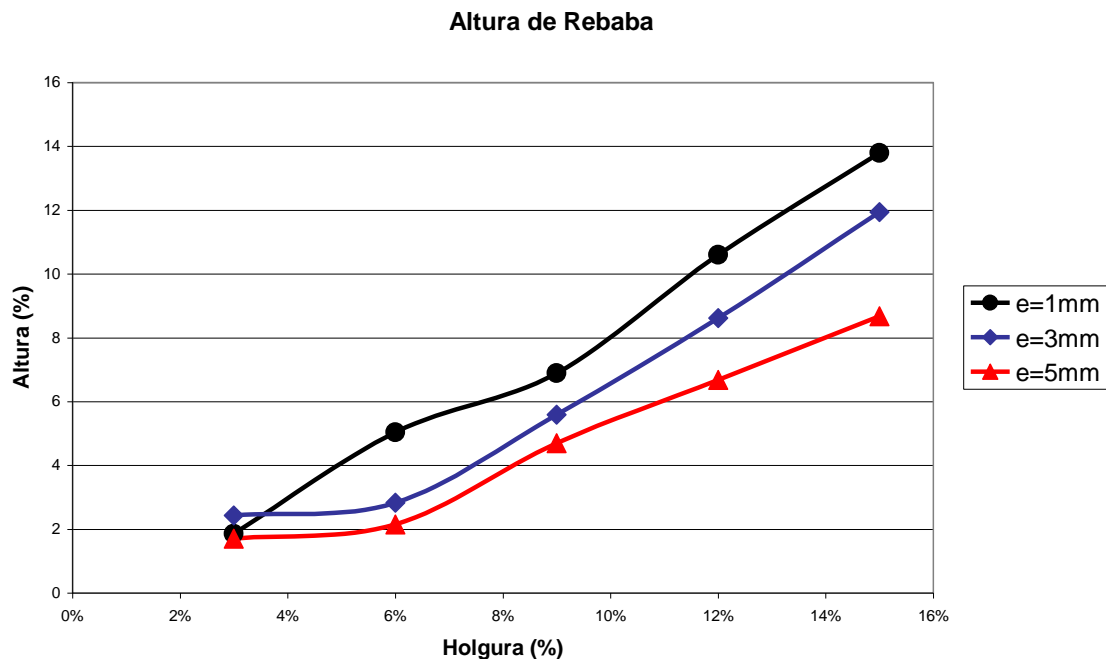


Figura 23: Gráfico de alturas de rebaba (DEFORM)

Comprobamos el sentido ascendente de la gráfica en los tres espesores. Este crecimiento de la altura se debe a que cuanto mayor es el espacio entre el macho y la matriz más cantidad de material cabrá y por lo tanto al romperse el volumen de material que compondrá la rebaba será mayor.

Atendiendo a la altura de la rebaba está claro que la holgura óptima será la menor posible que nos permita punzonar la pieza, pero a pesar de ello no es algo tan trascendente como la fuerza máxima ejercida el hecho de que la rebaba sea más o menos pronunciada, ya que en cualquier caso es muy pequeña y podremos eliminarla fácilmente con un sencillo proceso que deberemos llevar a cabo en cualquier caso si queremos un acabado perfecto.

Comparamos ahora la similitud que muestran nuestros resultados con los expuestos en el artículo antes mencionado obtenidos de ensayos reales así como de un programa de elementos finitos similar al utilizado en nuestro estudio.

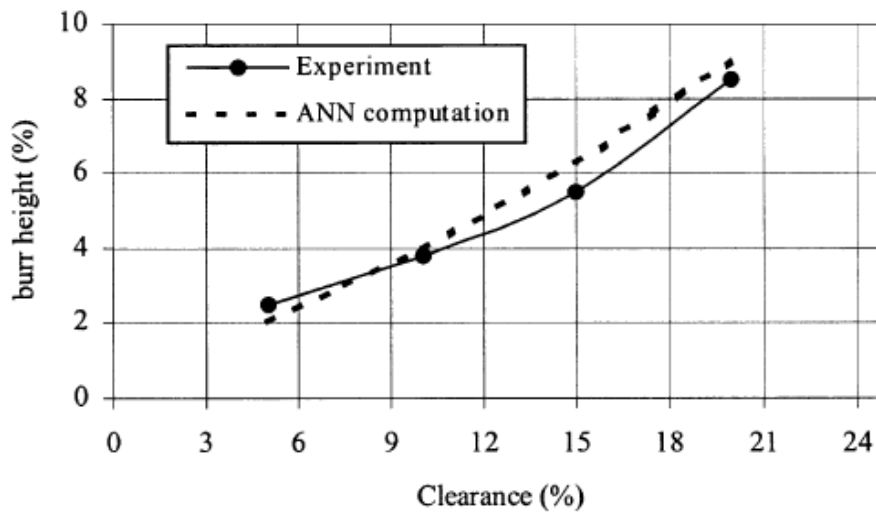


Figura 24: Altura de rebaba experimental (Artículo)

Comprobamos como efectivamente la gráfica en este caso también es creciente aunque los valores no coinciden exactamente con los obtenidos en nuestra simulación, esto es debido a que el modelo utilizado en el artículo tiene diferencias respecto al nuestro tanto en geometría como en el material utilizado, por lo que sólo buscamos que guarden una cierta similitud, no que coincidan exactamente estos valores.

- Conclusiones

Las conclusiones que extraemos de este estudio son que a medida que aumentamos la holgura proporcionada al utillaje la rebaba crecerá en tamaño resultando un peor acabado, por lo cual debemos encontrar un punto óptimo de holgura que nos permita tener fuerzas pequeñas y a la vez rebabas aceptables. Este punto óptimo será en función de nuestros requerimientos tanto de calidad, como de costes, por lo que lo definirá el diseño del proceso de producción.

3.3. Perfil del Recorte en Función de la Holgura

Estudiaremos ahora el resto del perfil de corte que se produce al cortar la chapa diferenciando las diferentes zonas dentro de este y analizando la altura de éstas en función de la proporción que representen respecto al grosor del perfil.

Para este nuevo estudio utilizaremos también el modelo anterior ya que disponemos de un gran abanico de datos de diferentes holguras y grosores.

El procedimiento de extracción de los datos es el mismo que el utilizado para conocer la altura de las rebabas, es decir, utilizaremos la herramienta brindada por el DEFORM para hacer las mediciones correspondientes sobre el modelo. Estas mediciones pueden tener cierto error ya que dependen del punto en el que situemos el cursor en la pantalla, aunque estos errores no son significativos, ya que son de tres órdenes de magnitud por debajo del de la medida principal.

Para poder comparar los resultados de este estudio utilizaremos otro artículo titulado: *Fracture criteria identi_cation using an inverse technique method and blanking experiment* (Anexo III). En este artículo se estudian las diferentes partes del corte perpetrado a la chapa así como otros aspectos que estudiaremos también a continuación.

En el artículo citado se utiliza un modelo diferente al que utilizaremos nosotros en nuestro estudio, por lo que puede haber diferencias en los valores, aunque lo que nos interesa comparar es la tendencia de los datos para comprobar la validez de los mismos.

Mostramos en el siguiente gráfico las zonas en las que se divide el perfil de corte:

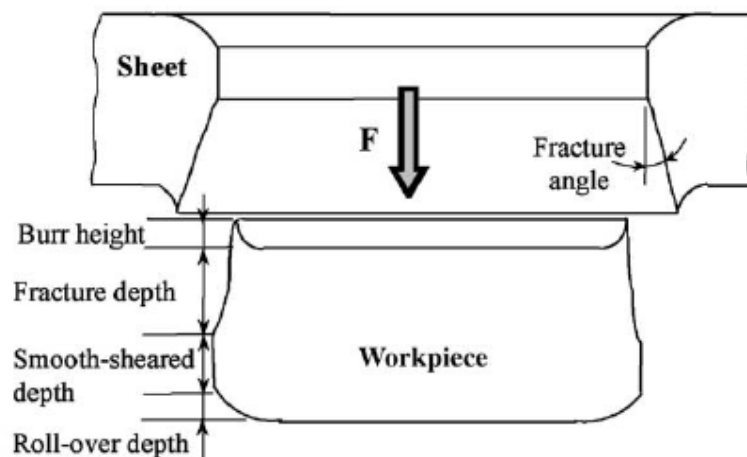


Figura 25: Zonas del corte

En el corte podemos diferenciar las siguientes zonas de arriba a abajo: rebaba, zona de fractura, zona bruñida, zona redondeada con deformación plástica.

Vemos en el siguiente gráfico como quedan simuladas en nuestro modelo estas zonas:

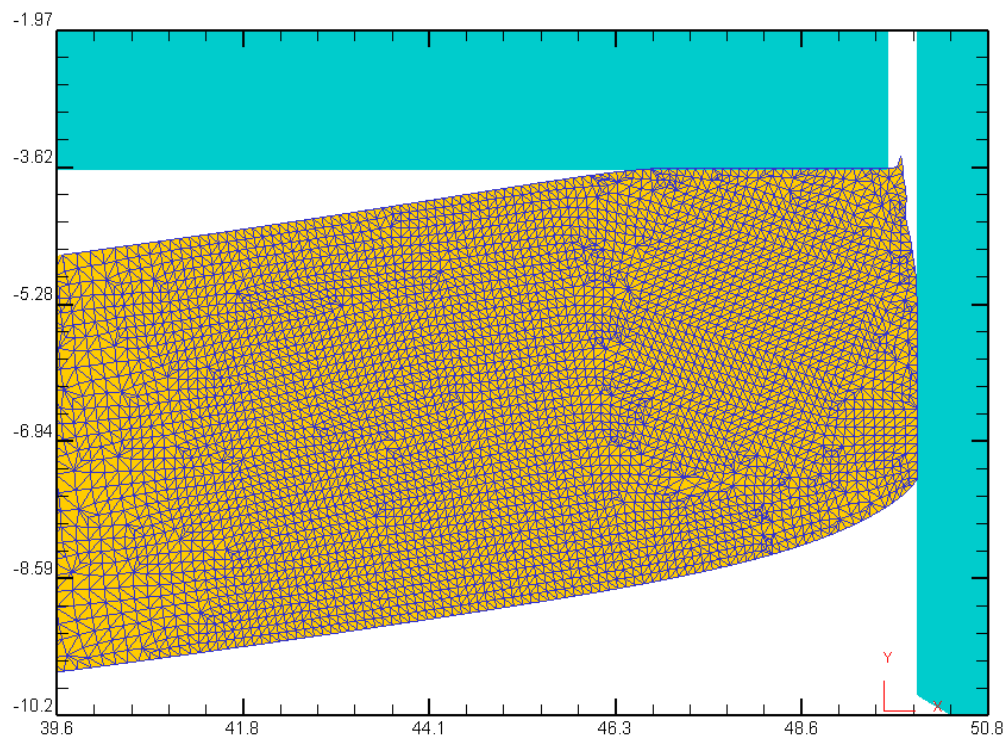


Figura 26: Perfil de corte en nuestro modelo

Apreciamos que en nuestro modelo, a diferencia del utilizado en el artículo en el que nos basamos, la chapa sufre más deformación por flexión, y esto es debido a que el diámetro es muchas veces mayor que el espesor de la chapa, cosa que no ocurre en el artículo. Nuestro perfil tendrá las mismas zonas de corte, pero también debemos tener en cuenta que quedará flectada produciéndose una forma cóncava.

Exponemos a continuación los resultados obtenidos en nuestro estudio mediante gráficas representativas del porcentaje en altura que representan las diferentes zonas de corte en los tres espesores de chapa en los que centramos nuestro estudio.

- Zona de Fractura

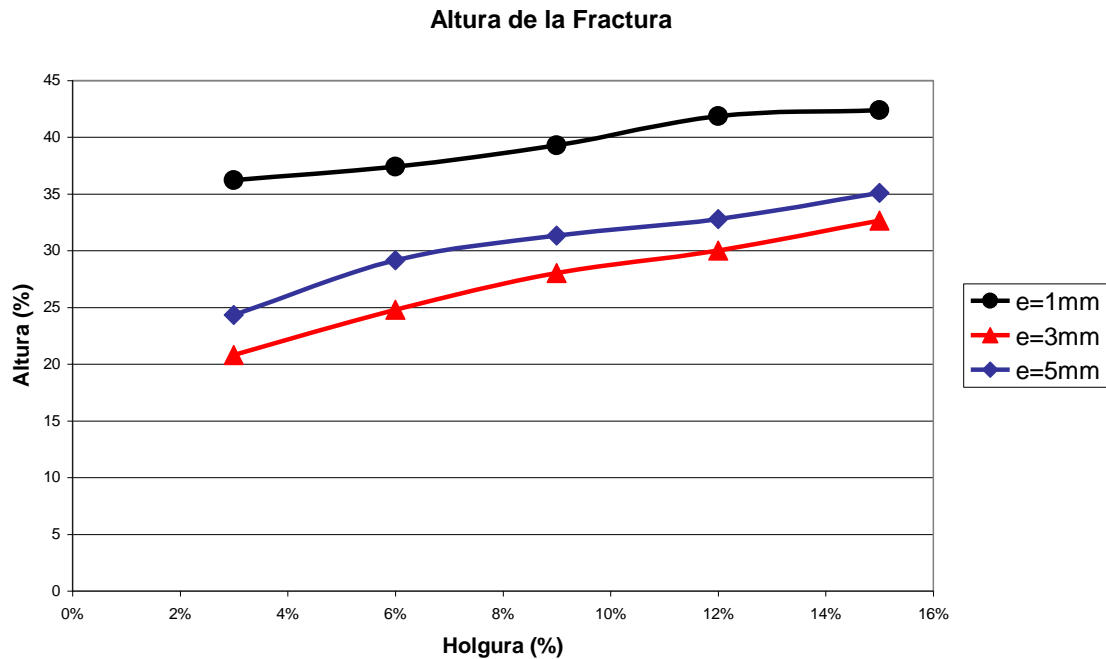


Figura 27: Altura de la Zona de Fractura (DEFORM)

Comprobamos el sentido creciente de la altura de la zona de fractura con la holgura, esto se debe a que la separación diagonal de las puntas de corte de las herramientas (macho y matriz) será mayor cuanto más holgura tengamos, por lo que la zona de fractura será mayor. Esta altura va en detrimento de la calidad del corte ya que se trata de una zona árida y no perpendicular al eje principal de la chapa.

En este caso no podemos obtener una relación directa con la experiencia real ya que el artículo en cuestión omite la información acerca de esta zona en concreto. Compararemos la evolución del resto de las zonas y basaremos la validez de estos datos en la validez que tengan los del resto de las zonas.

- Zona Bruñida

A continuación extraemos los datos correspondientes a la zona bruñida que obtenemos en nuestra simulación. La característica principal de esta zona es que es recta, ya que pega directamente con el utillaje, y al haber recorrido un cierto espacio vertical se ha pulido con el rozamiento quedando esta zona brillante y lisa.

Es deseado en un proceso de punzonado que la zona bruñida sea lo más extensa posible ya que el acabado de la pieza es mejor.

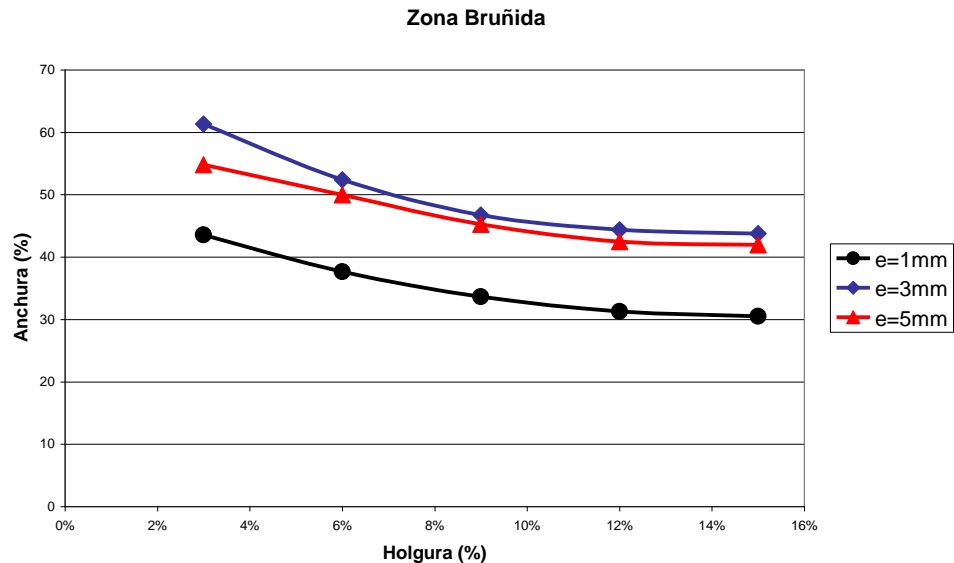


Figura 28: Altura de la Zona Bruñida

Vemos que la zona bruñida decrece con la holgura, esto es debido precisamente a que la zona de fractura crece con el aumento de la separación macho-matriz dejando pegada al utillaje menor parte del perfil. Atendiendo al criterio de la proporción de cada una de estas zonas que se dan en el perfil se podría decir que el acabado será mejor cuanto menos holgura tengamos, ya que la zona de fractura será mínima y la bruñida máxima, lo cual es deseable.

Comparamos nuestros resultados con la siguiente gráfica obtenida del artículo que habla de estos perfiles y al que referimos nuestro estudio.

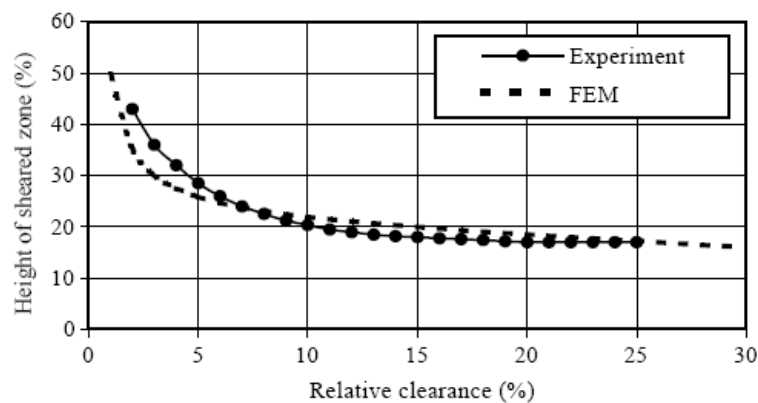


Figura 29: Altura de la Zona Bruñida vs. Holgura (Artículo)

Apreciamos el sentido descendente del gráfico de datos experimentales comprobando la similitud que hay con respecto a nuestros datos y teniendo en cuenta que el modelo utilizado es diferente tanto geométricamente como en el material utilizado.

- Zona Redondeada

Por último analizamos la evolución de la zona redondeada que ha sufrido una deformación plástica a causa del estiramiento del material en la dirección positiva del eje vertical. Mostramos a continuación los datos arrojados por el DEFORM:

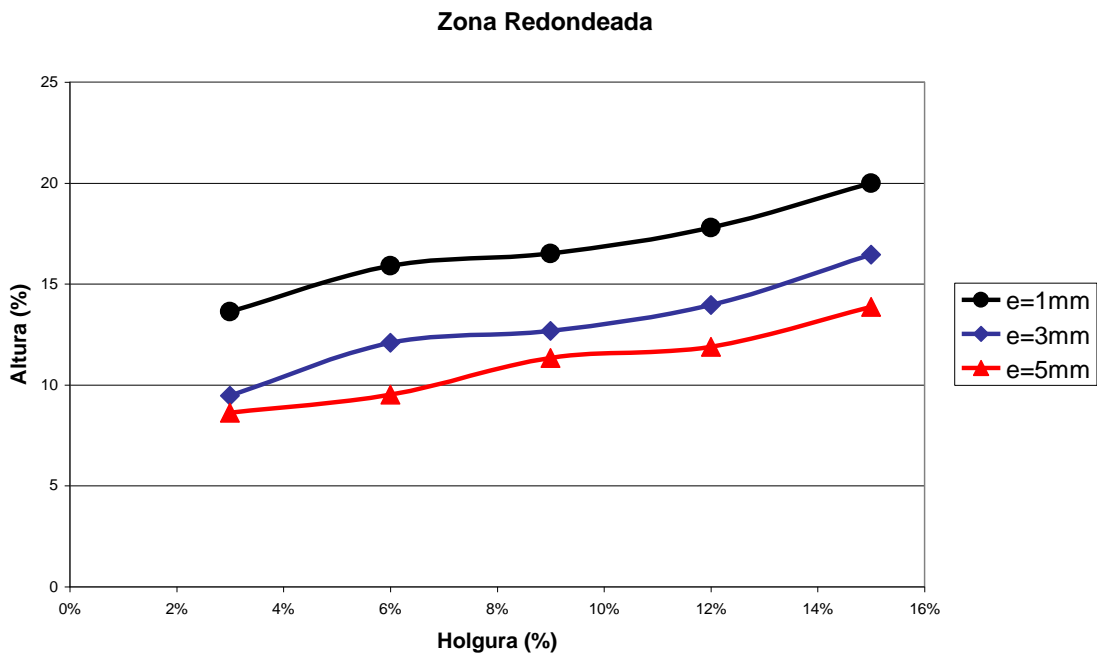


Figura 30: Altura de la Zona Redondeada

En esta última zona la evolución respecto a la holgura es ligeramente creciente aunque no de una forma muy acusada, esto significa que la variación con la holgura no es demasiado considerable. La razón por la que crece es, al igual que pasaba con la rebaba, que cuanto más holgura le proporcionemos al utillaje más material penetrará entre macho y matriz y por lo tanto tirará de la parte inferior produciéndose mayor deformación plástica.

Comparamos también la evolución de esta zona con la experimental expuesta en el artículo y comprobamos que también se guarda cierta similitud en el sentido en que ambas son crecientes.

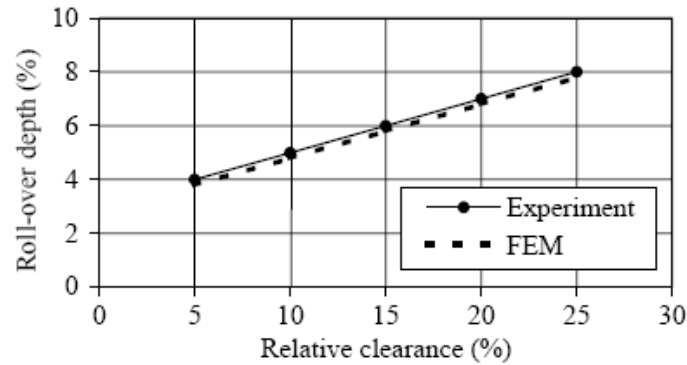


Figura 31: Altura de la Zona Redondeada vs. Holgura (Artículo)

3.4. Inicio de la Fractura en Función de la Holgura

Como estudio final de las relaciones existentes entre la holgura y otros factores que influyen en el proceso de punzonado haremos un análisis del momento del recorrido del punzón en el que se inicia la fractura. Consideraremos que el inicio de la fractura se produce en el momento en que la fuerza ejercida por el punzón es máxima según se expone en el artículo del Anexo I.

El modelo que utilizaremos será el mismo que en todos los casos anteriores, del que extraemos los siguientes datos referentes al momento de inicio de la fractura:

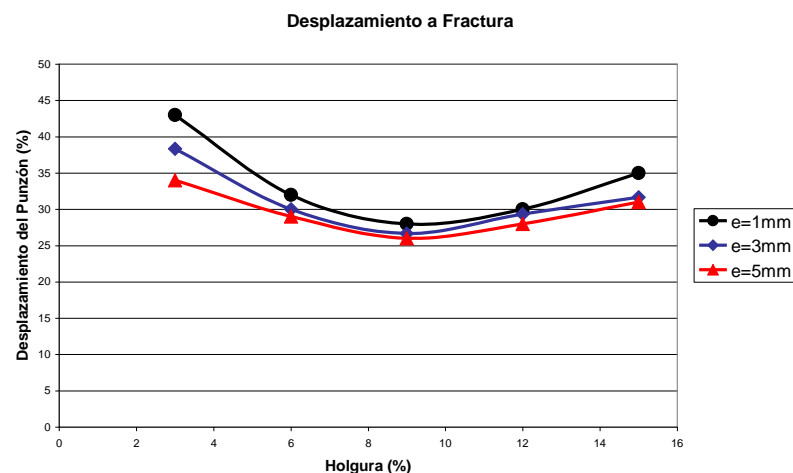


Figura 32: Inicio de la fractura en función de la holgura

Comprobamos que la gráfica muestra un mínimo precisamente para una holgura del 9%, esto demuestra por qué la fuerza mínima se produce cuando tenemos una holgura del 9% y es debido a que las dos fracturas que comienzan en las puntas del utillaje se encuentran antes que para otras holguras ya que estas van una hacia la otra directamente para esta holgura, por lo que se encontrarán antes y no será necesaria más fuerza para romper la pieza como en el caso de otras holguras.

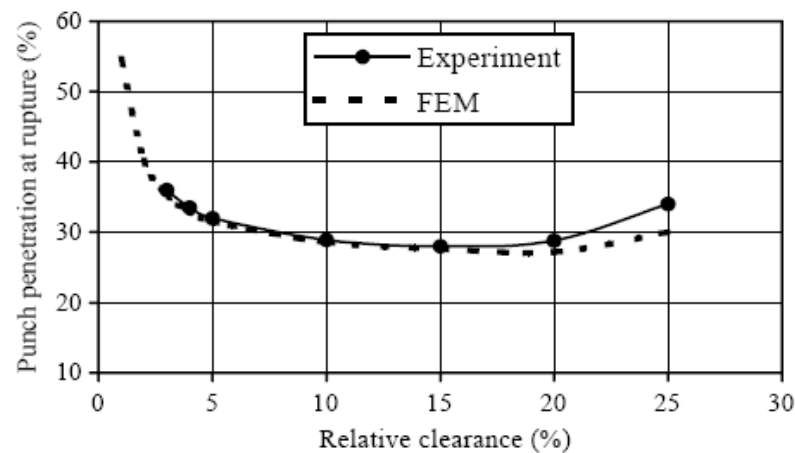


Figura 33: Penetración a fractura (Artículo)

Apreciamos que los datos del artículo también tienen un mínimo en la holgura óptima que el artículo considera para su modelo que como ya hemos comentado antes no es igual que el nuestro pero lo podemos considerar semejante a efectos de comparaciones generales.

4. Influencia del Desgaste en el Utillaje

Llevaremos a cabo ahora un estudio acerca del desgaste que sufren las herramientas que utilizaremos en nuestro proceso debido al uso reiterado de las mismas. Las herramientas que entran en juego en esta clase de procesos son el punzón y la matriz.

Las herramientas sufren desgaste en sus aristas debido al desprendimiento progresivo de material tras sufrir un proceso de fatiga a lo largo de los diferentes ciclos que realiza en su vida útil. Se muestra a continuación la diferencia entre un perfil de una herramienta nueva y el de una herramienta desgastada.

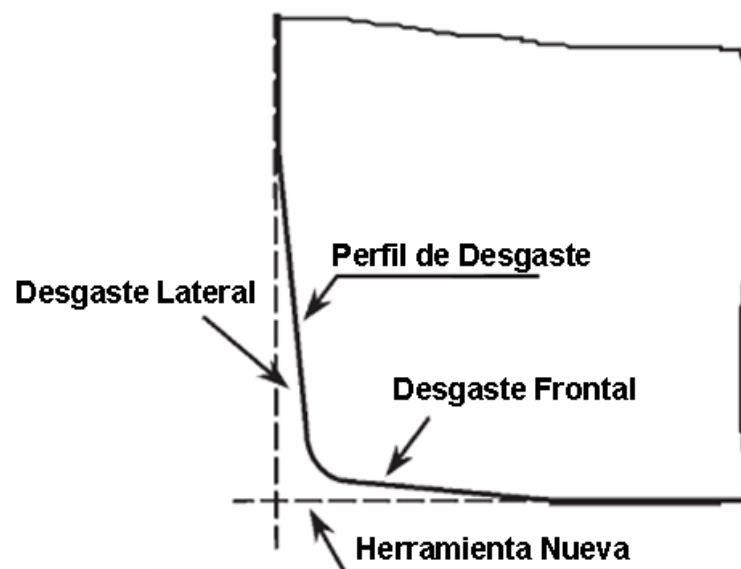


Figura 34: Desgaste de la herramienta

En nuestra simulación no reproduciremos todo el perfil de la herramienta desgastada, sino que para simplificar el problema de una forma aceptable únicamente proporcionaremos a nuestras herramientas un radio de acuerdo en las aristas de corte. Utilizaremos el modelo de los apartados anteriores en el que únicamente cambiaremos los radios de acuerdo quedando configurado de la siguiente manera:

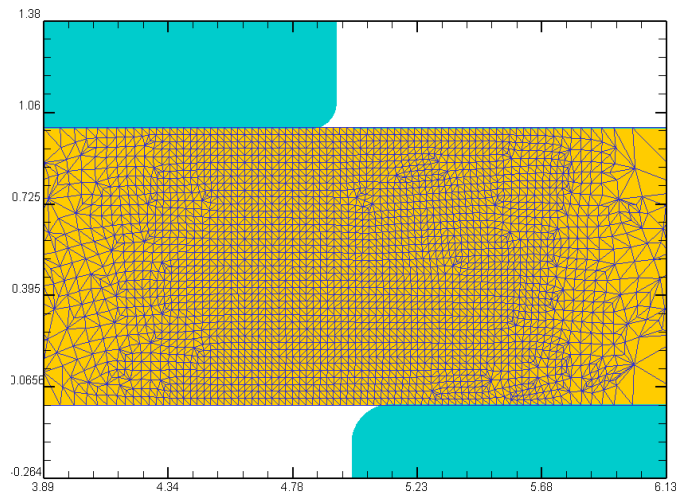


Figura 35: Simulación con herramientas desgastadas

Una vez más basaremos nuestro estudio en un artículo científico que trata sobre ensayos reales con herramientas desgastadas. El artículo tiene como título *Blanking tool wear modeling using the finite element method*, y se muestra en el Anexo IV. En este artículo se dan unos valores para el radio de acuerdo en función del desgaste de la herramienta, para poder simularla en un modelo de elementos finitos. Se considera que una herramienta nueva tiene un radio de acuerdo de 0,01mm ya que no existe un acabado perfecto al que le correspondería un radio de acuerdo nulo. Para una herramienta que se encuentre al final de su vida útil podemos considerar que el desgaste es de 0,2 mm ya que así se dice en el citado artículo. Para poder construir gráficos de la evolución de los distintos aspectos del punzonado tomaremos valores intermedios de desgaste propuestos también en el artículo.

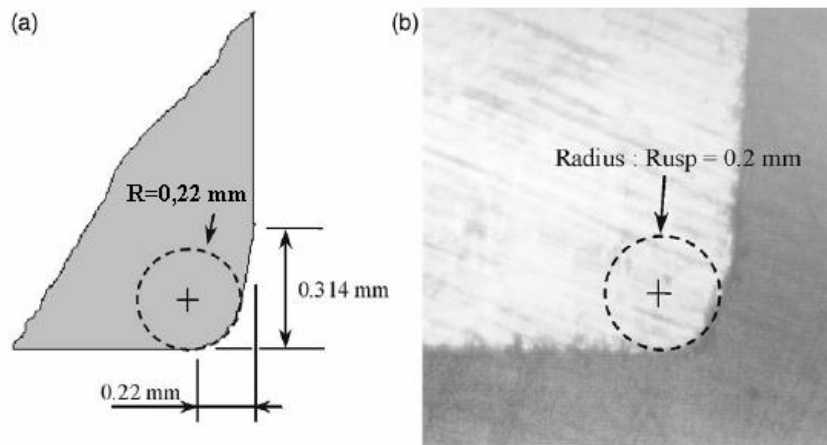


Figura 36: Perfil de desgaste tras 20.000 ciclos. a) Modelo E.F. b) Experimental

Para todos los ensayos que vamos a realizar trabajaremos con una holgura relativa del 9%, ya que es la holgura de trabajo óptima que hemos hallado en nuestro estudio anterior. Los resultados expuestos en el artículo corresponden a una holgura del 10% ya que ésta es considerada por el autor del artículo como óptima, por lo que es una decisión acertada trabajar con esta holgura.

El estudio constara de 14 ensayos en los que analizaremos la fuerza ejercida por el punzón en cada momento de desgaste de la herramienta, así como la altura de las rebabas que se producen, el inicio de la fractura y las tensiones internas sufridas por las herramientas nuevas y desgastadas.

Haremos ensayos en la gama de espesores de chapa habitual, es decir en 1, 3 y 5mm utilizando desgastes de 0,01/0,06/0,12 y 0,2 en cada uno de los tres, de este modo conseguiremos un amplio abanico de resultados que nos permitirán sacar conclusiones más sólidas.

Este estudio nos permitirá determinar a partir de que nivel de desgaste podemos desechar la herramienta porque el acabado deja de ser válido para nuestros requerimientos de calidad.

4.1. Fuerzas en Función del Desgaste

Procederemos ahora al análisis de las fuerzas ejercidas por el punzón según va progresando el desgaste de la herramienta. Este estudio lo haremos para los tres espesores que estamos utilizando habitualmente es decir 1, 3 y 5mm. Utilizaremos los radios de desgaste expuestos anteriormente.

Los resultados de nuestro estudio se exponen en la gráfica que se muestra a continuación, en la que podemos apreciar la evolución que sigue la fuerza ejercida por el punzón según se va produciendo la penetración en la chapa para los distintos momentos de desgaste.

- Chapa de espesor 1mm

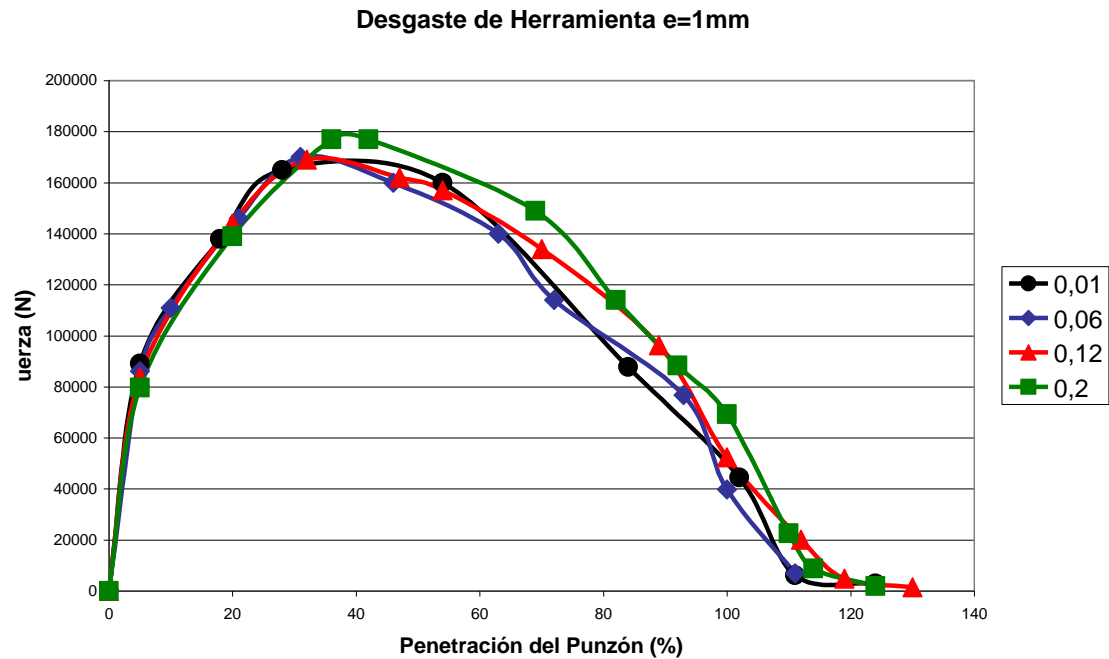


Figura 37: Evolución de fuerza en función del desgaste en e=1mm

Apreciamos como la fuerza máxima ejercida por el punzón tiene lugar cuando la herramienta está totalmente desgastada, siendo esta mayor que la fuerza máxima cuando la herramienta está nueva. Esto demuestra que a medida que se va desgastando la herramienta las fuerzas necesarias para producir el corte serán mayores, por lo que no conviene alargar mucho la utilización de los punzones ya que a parte de que el acabado será cada vez peor también estaremos gastando más energía en nuestro proceso, por lo que habrá que encontrar un equilibrio tanto económico como de calidad para determinar la vida útil de los punzones.

La razón por la que es necesaria menos fuerza al utilizar un punzón nuevo respecto a utilizar uno desgastado es que las aristas vivas de la herramienta nueva crean una mayor concentración de tensiones en el material debido a que la superficie de contacto será menor y por lo tanto a igualdad de fuerzas la tensión será mayor. A medida que se incrementa el desgaste la fuerza debe ser mayor para alcanzar la tensión de rotura.

Vemos a continuación que ocurre en los casos de chapas de espesores de 3 y 5 mm para saber si podemos extrapolar las conclusiones obtenidas con la chapa de 1mm a un rango de grosores de entre 3 y 5mm ya que es este rango el objeto de nuestro estudio.

- Chapa de espesor 3mm

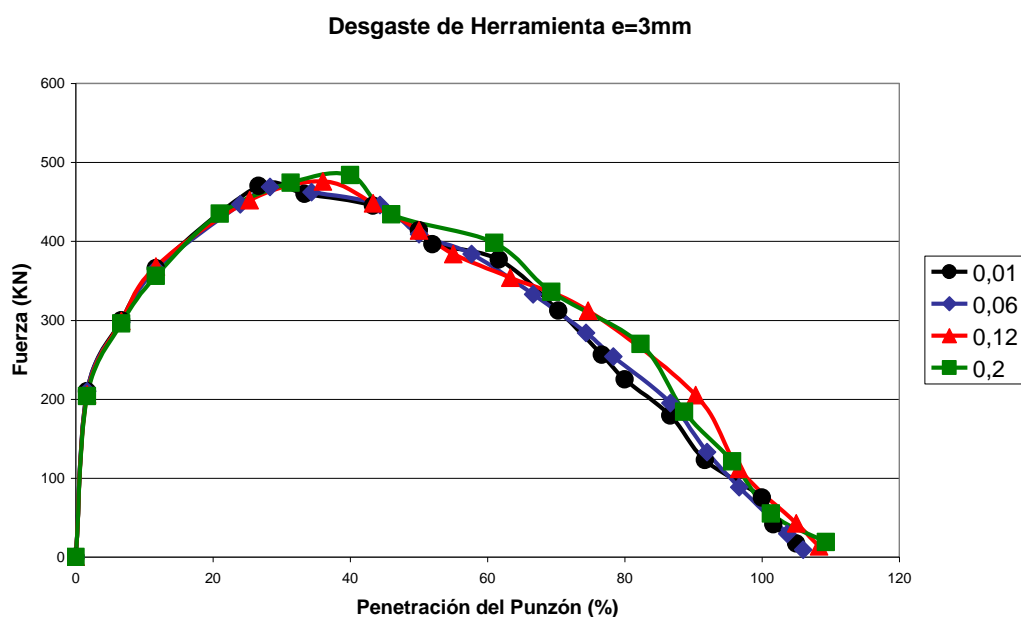


Figura 38: Evolución de fuerza en función del desgaste en e=3mm

- Chapa de espesor 5mm

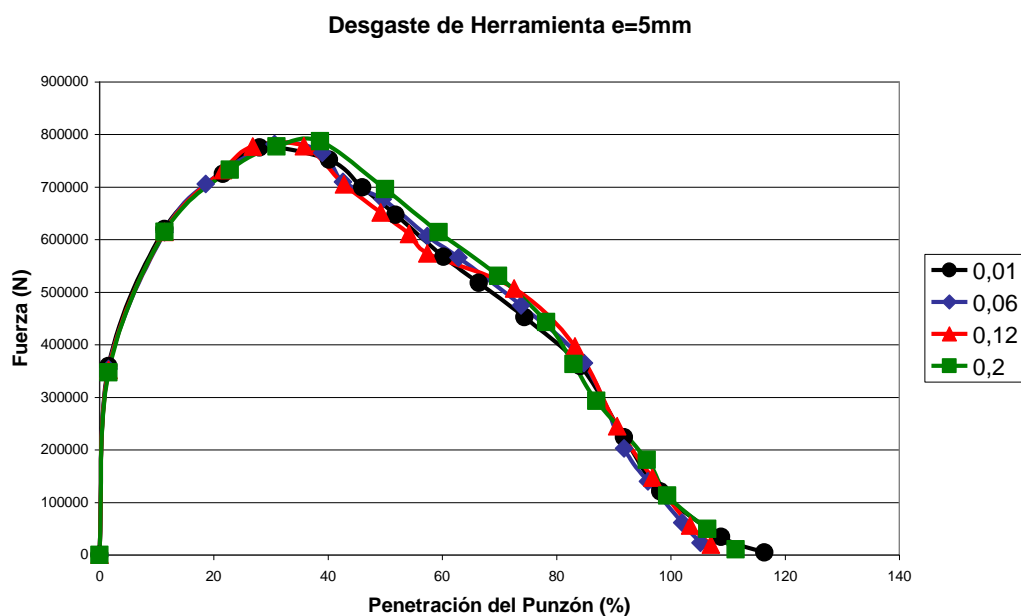


Figura 39: Evolución de fuerza en función del desgaste en e=5mm

Observamos que para las chapas de espesores 3 y 5mm se sigue manteniendo el comportamiento que se tenía en la chapa de espesor 1mm, por lo que podemos decir que en este rango de espesores ese será el comportamiento que seguirá la fuerza a medida que evoluciona el desgaste.

Para validar nuestra hipótesis sobre el comportamiento de las fuerzas frente al desgaste de la herramienta utilizaremos el artículo al que nos hemos referido anteriormente (Anexo IV) con el propósito de comparar los resultados obtenidos con el DEFORM con datos experimentales, así como de otras simulaciones utilizando elementos finitos.

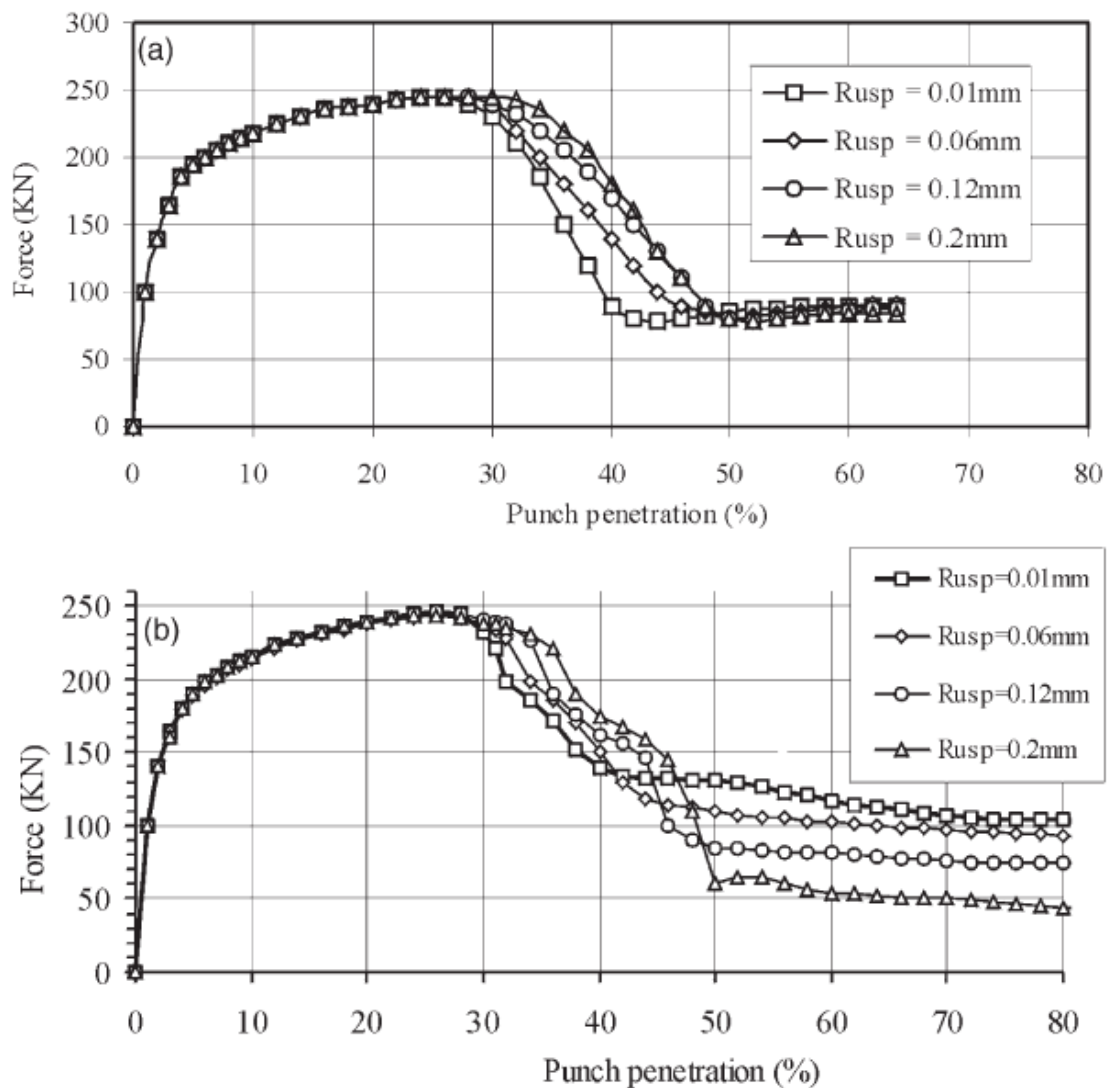


Figura 40: Fuerza en Función del Desgaste. a) Simulación b) Experimental

En los gráficos extraídos del artículo en cuestión podemos observar que el comportamiento inicial no varía con el desgaste, ya que antes de producirse la fractura la fuerza de compresión es la misma en todos los casos.

Apreciamos también que una vez producida la fractura (punto de fuerza máxima) tanto el gráfico de la simulación como el experimental siguen la misma distribución en lo referente a que se ejerce más fuerza cuanto más desgaste ha sufrido la herramienta. Esto ocurre igualmente en el modelo que hemos utilizado nosotros como ya hemos comentado antes.

La única diferencia entre el comportamiento experimental y el que resulta de las simulaciones, tanto en las del artículo como en las nuestras, es que en la experimental, hacia el final del recorrido del punzón, las fuerzas se invierten siendo mayores las ejercidas por un punzón nuevo que por uno desgastado. Este comportamiento puede ser debido a que, al haber más desgaste, el espacio entre el macho y la matriz es mayor y el material entrará mejor en la holgura resultante en el utillaje no haciendo falta tanta fuerza para comprimirlo ya que el rozamiento con las paredes será menor al no haber tanta tensión.

4.2. Rebabas en Función del Desgaste

Estudiamos ahora la evolución de las rebabas resultantes en los diferentes estados de desgaste de la herramienta para analizar el impacto de este desgaste sobre el acabado del material con el que estamos trabajando.

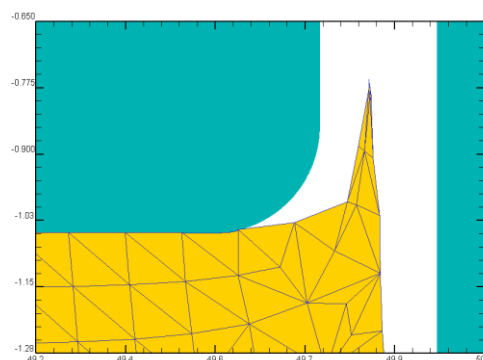


Figura 41: Detalle de rebaba con la herramienta desgastada

Para realizar este estudio extraeremos las medidas de las rebabas que se forman en nuestras simulaciones en los diferentes puntos de desgaste así como en los diferentes espesores con los que hemos ensayado. Posteriormente compararemos los resultados obtenidos con los mostrados en el artículo adjunto.

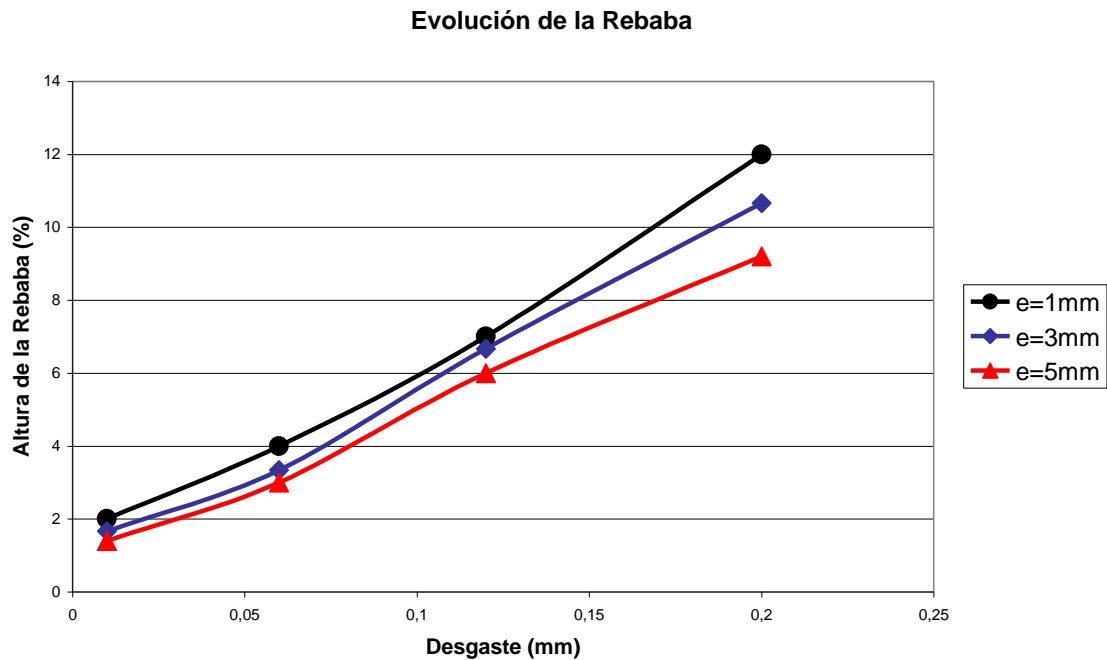


Figura 42: Desgaste vs. altura de rebaba

Observamos la tendencia creciente de la altura de las rebabas según se va desgastando la herramienta, esto se debe a que, como ya hemos dicho antes, al haber más espacio entre macho y matriz cabrá más material entre ambos provocando esto que las rebabas resultantes estén compuestas por un mayor volumen de materia por lo tanto serán más grandes.

Se puede apreciar también como el tamaño de las rebabas representa un mayor porcentaje, respecto al espesor, cuanto más fina sea la chapa ya que el radio de desgaste utilizado es el mismo en los tres casos, por lo que afectará más a la chapa de menor espesor.

Comparamos nuestros resultados con los que ofrece el artículo, referentes tanto a ensayos experimentales como a simulaciones en un programa de elementos finitos similar al utilizado en este proyecto.

Se muestra a continuación la gráfica antes mencionada:

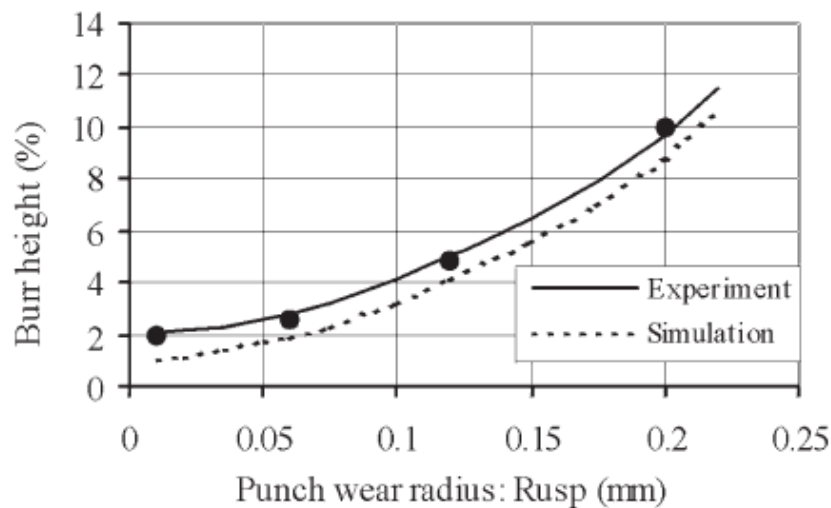


Figura 43: Desgaste vs. altura de rebaba (Artículo)

Observamos que efectivamente el sentido de crecimiento de la altura de las rebabas es creciente tanto en los datos experimentales como en los datos procedentes de la simulación. También se aprecia que los valores porcentuales expresados en este gráfico corresponden, de una forma muy aproximada, a los obtenidos en nuestras simulaciones.

Teniendo en cuenta que la rebaba crece a medida que la herramienta se desgasta debemos tener en cuenta que el acabado final de las primeras piezas que se produzcan será mejor que el de las piezas producidas al final de la vida útil del punzón. Debemos tener en cuenta esto a la hora de calcular la duración de la herramienta ya que determinará la calidad de las piezas producidas por lo que llegará un momento en el que ésta no sea aceptable.

4.3. Inicio de la Fractura en Función del Desgaste

Este análisis pretende darnos una idea de la variación del momento en el que se inicia la fractura en función del estado de desgaste de la herramienta. Es importante que la fractura se inicie lo antes posible ya que el trabajo ejercido por el punzón depende de la fuerza y el desplazamiento de éste, por lo que cuanto antes se produzca esta fractura menos trabajo realizará en punzón, teniendo en cuenta que las fuerzas máximas se producen justo antes del inicio de la fractura.

Una vez más extraeremos los datos arrojados por el DEFORM y los expondremos en la gráfica que se muestra a continuación y que posteriormente compararemos con los datos experimentales que nos aporta el artículo.

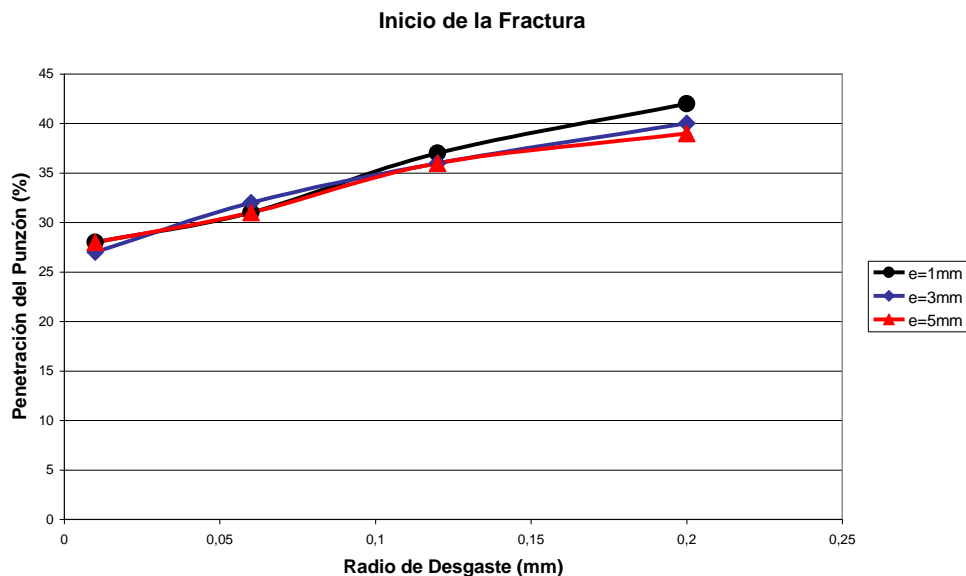


Figura 44: Inicio de la fractura en función del desgaste

Vemos como a medida que aumenta el desgaste de la herramienta se necesita más penetración del punzón para iniciar la fractura ya que como hemos dicho anteriormente la tensión ejercida por las puntas cortantes del utillaje disminuye con el desgaste por aumentarse el área de contacto, por lo que se necesitará más compresión del material entre las paredes del utillaje para alcanzar la tensión de rotura del material y que la fractura se inicie. Para conseguir dicha compresión crítica se necesita mayor penetración del punzón para que se inicie la fractura.

Comparamos nuestros resultados con los experimentales que se muestran a continuación.

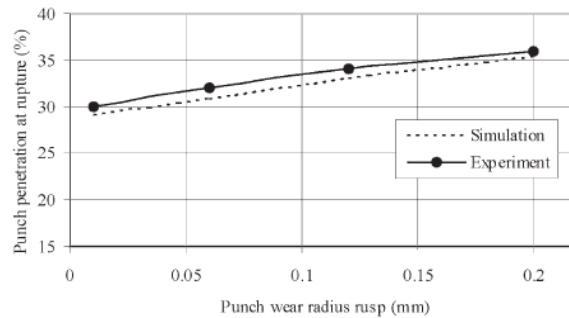


Figura 45: Inicio de la fractura en función del desgaste (Artículo)

Observamos una evolución muy similar en los resultados tanto experimentales como en los procedentes de la simulación realizada por el autor del artículo. Recordamos que no estamos trabajando con el modelo exacto utilizado en el artículo, por lo que nuestros datos pueden presentar cierta variabilidad respecto a los expuestos en este.

4.4. Tensiones en el Utillaje en Función del Desgaste

Por último y para completar nuestro estudio del desgaste que se produce en las herramientas y los efectos que esto tiene sobre el conjunto, analizaremos las tensiones internas que sufren las herramientas a lo largo del proceso, tanto para cuando estas son nuevas como para cuando han sufrido desgaste.

Para llevar a cabo este estudio mallaremos las herramientas del modo en que se explica en el apartado 2 de este proyecto. Utilizaremos un acero AISI D2 (alto contenido en carbono y en cromo) para las herramientas ya que este tipo de utillaje es muy frecuente en la industria, especialmente en herramientas de punzonado (también explicado en apartado 2).

Estudiaremos dos casos límite, el primero será un caso ideal, en el que no existe desgaste de la herramienta, y el segundo será un caso de desgaste severo en el que consideramos un radio de acuerdo de las aristas del utillaje de 0,2mm ya que, como en

los apartados anteriores, lo hemos considerado propio de una herramienta desgastada al final de su vida útil.

La tensión efectiva arrojada por el DEFORM corresponde a la tensión de Von Mises calculada con la siguiente expresión:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Comparamos esta tensión con la resistencia a fluencia del acero AISI D2, que hemos impuesto al utillaje, para sacar conclusiones sobre el fenómeno del desgaste.

4.3.1. Utillaje Nuevo

En el siguiente gráfico extraído del programa DEFORM, se aprecia las zonas de las herramientas sometidas a mayor tensión que, como era de esperar, son las aristas de corte del punzón y de la matriz. Esta tensión máxima se produce en el momento de máxima fuerza ejercida por el punzón.

Comparando el valor máximo de tensión efectiva que nos aporta el DEFORM (2.230 MPa) con la resistencia a fluencia del acero considerado en el utillaje (1.317 MPa) vemos que la tensión alcanzada en el utillaje es mayor que la tensión elástica límite del material, por lo que plastificará en la zona más afectada. A causa de esta plastificación el material se deteriora ciclo tras ciclo produciéndose el desgaste de las aristas vivas.

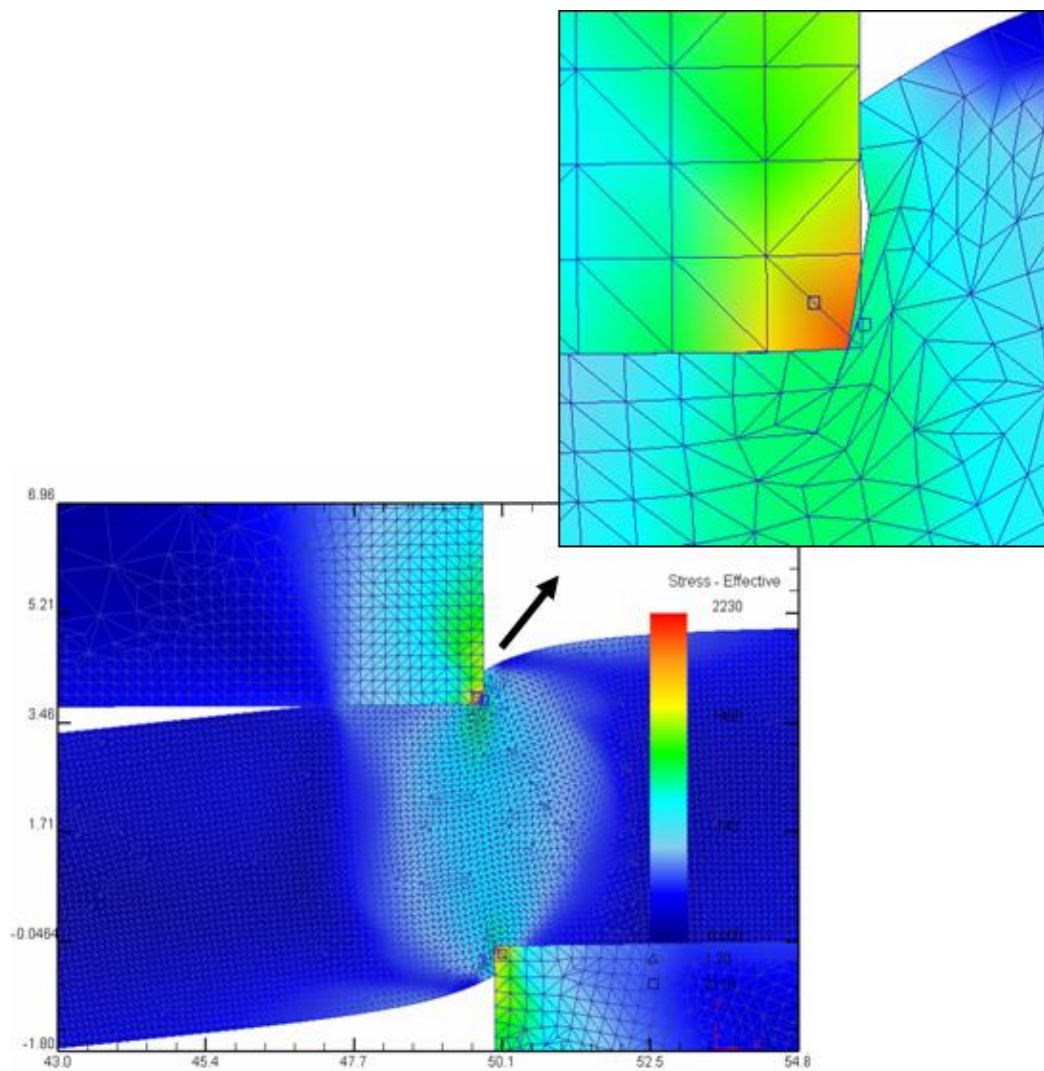


Figura 46: Tensiones en el utillaje con herramienta nueva

4.3.2. Utillaje Desgastado

Comparamos ahora lo que ocurre en una herramienta desgastada. En este caso las tensiones alcanzadas son inferiores, ya que al aumentar la superficie de contacto la tensión que se produce en el utillaje es menor.

Vemos que según DEFORM la tensión alcanzada en el utillaje es en torno a 1.200 MPa y nuestro acero soporta sin plastificar una tensión máxima de 1.317 MPa, por lo que éste se mantendrá en la zona elástica una vez desgastada la herramienta en sus aristas.

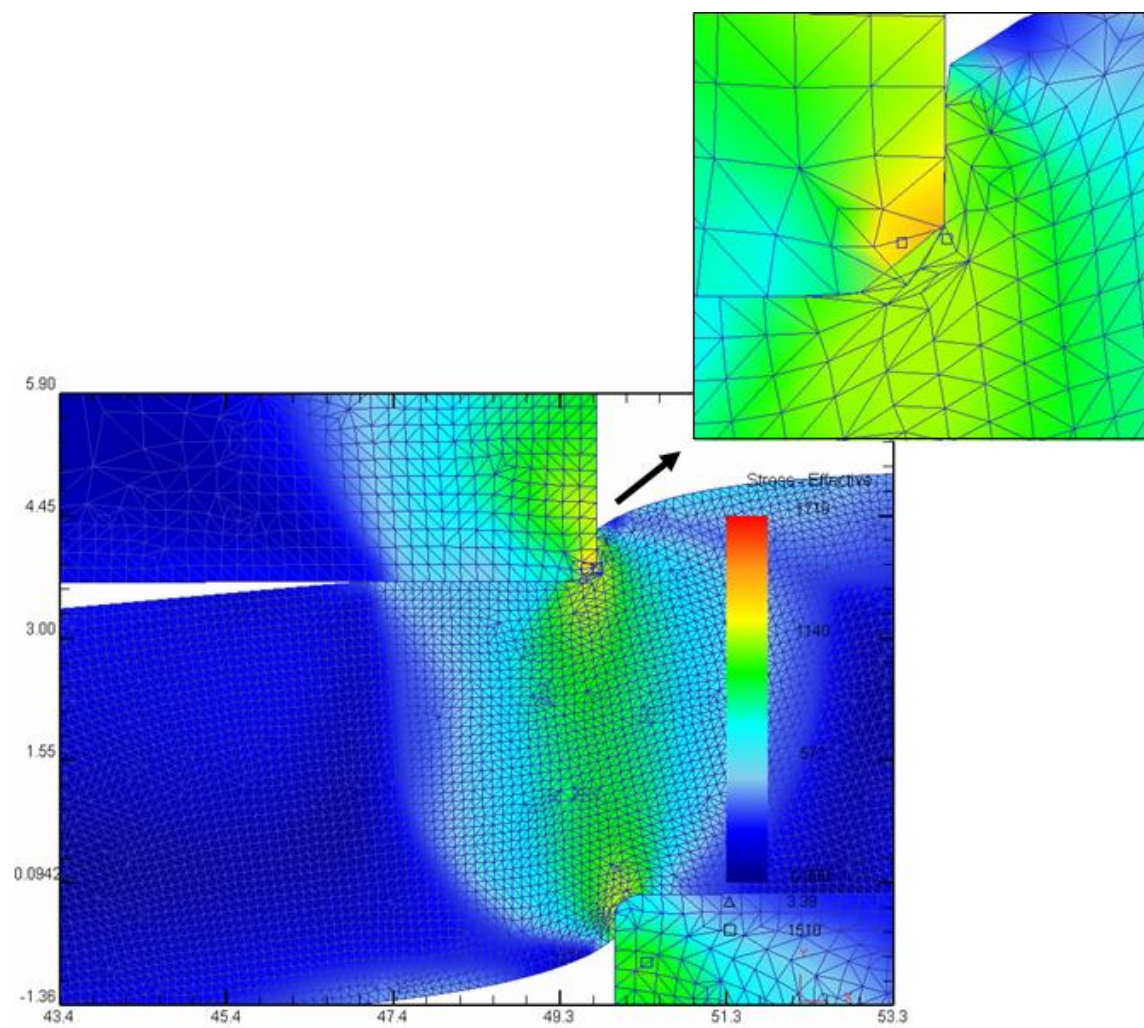


Figura 47: Tensiones en el utillaje con herramienta desgastada

5. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer tras la realización de los diferentes estudios son las que se enumeran a continuación:

- Se comprueba, en primer lugar, la utilidad de utilizar un programa de simulación numérica, como es el DEFORM, para analizar procesos de fabricación sin necesidad de realizar ensayos reales. Se ha comprobado que el modelo implementado se asemeja a las experiencias reales obtenidas de artículos científicos que consideramos una fuente de información fiable.
- Tras un primer estudio en el que se pretende hallar una holgura óptima para procesos de punzonado de chapas de aceros inoxidable austeníticos dentro de un rango de espesores que va de 1 a 5mm la conclusión que se obtiene es que con una holgura relativa del 9% las fuerzas que intervienen en el proceso son mínimas. Este valor de holgura se puede extrapolar a los espesores de chapa comprendidos entre los rangos antes citados.
- En un segundo estudio realizado se analizan las alturas de las rebabas que se producen en función de la holgura proporcionada al utillaje. Se obtiene como conclusión de este estudio que la rebaba será tanto mayor cuanto más holgura se tiene, por lo tanto según este criterio la holgura óptima sería la menor posible, aunque ésta no es tan interesante como puede ser la hallada en el estudio de fuerzas máximas.
- Se ha estudiado también el perfil de corte obtenido en la chapa tras su punzonado. Se comprueba una vez más que las zonas de corte que se desea que sean mayores para obtener un buen acabado, serán decrecientes con la holgura, por lo que cuanto menos holgura se de al utillaje mejor acabado tendrán las piezas.
- En un último estudio se analiza la evolución del proceso en función del desgaste del utillaje producido por la fatiga en los sucesivos ciclos de trabajo. Se obtiene de

este estudio que al desgastarse las herramientas las fuerzas ejercidas por el punzón son mayores que cuando ésta estaba nueva y que el acabado de la pieza es notablemente peor, sobre todo en lo que se refiere a rebabas.

6. Trabajos Futuros

Este proyecto se ha centrado en un campo muy concreto de condiciones de trabajo ya que los materiales utilizados se reducen a chapas de acero inoxidable austenítico de los tres espesores más típicos (1, 3 y 5mm).

Para continuar el estudio y ampliarlo a otros campos se debería primero investigar si las holguras óptimas halladas para chapas de acero inoxidable pueden extrapolarse a otros materiales industriales de interés.

Se debería también comprobar si el comportamiento en chapas de espesores muy finos o muy gruesos es semejante al que tienen las chapas tratadas en este estudio.

Se podría investigar que ocurriría en la distribución de tensiones si se utilizan otras geometrías de punzones que no se pudieran implementar con un planteamiento axisimétrico. Otro aspecto interesante es el estudio de la influencia en los resultados del punzonado de punzones con frente “no plano”.

Asimismo debería estudiarse la influencia de los recubrimientos en punzones y matrices, de compuestos derivados del titanio en la fuerza total del punzonado y en la vida del utillaje

7. Anexos y Referencias

7.1. Anexos

7.1.1. Anexo I: Aspectos analíticos y tecnológicos del proceso de punzonado de chapa [1]

Mateos, S.; Rico, J.C.; Cuesta, E.; Valiño, G.

Departamento de Ingeniería de Fabricación

Universidad de Oviedo

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de conformado de chapa en general, y en particular el proceso de punzonado, suelen asociarse con procesos mecánicos relativamente simples de reducida aportación tecnológica y escaso valor añadido. Sin embargo, la realidad es muy diferente ya que estos procesos, al igual que otros procesos de tipo mecánico, están fuertemente influenciados por factores muy diversos relacionados con la máquina, las herramientas, el material y características geométricas de la pieza o el propio entorno del proceso (tabla 1).

El punzonado es una operación de corte de chapas o láminas, generalmente en frío, mediante un dispositivo mecánico formado por dos herramientas: el punzón y la matriz. La aplicación de una fuerza de compresión sobre el punzón obliga a éste a penetrar en la chapa, creando una deformación inicial en régimen elastoplástico seguida de un cizallamiento y rotura del material por propagación rápida de fisuras entre las aristas de corte del punzón y matriz. El proceso termina con la expulsión de la pieza cortada (figura 1).

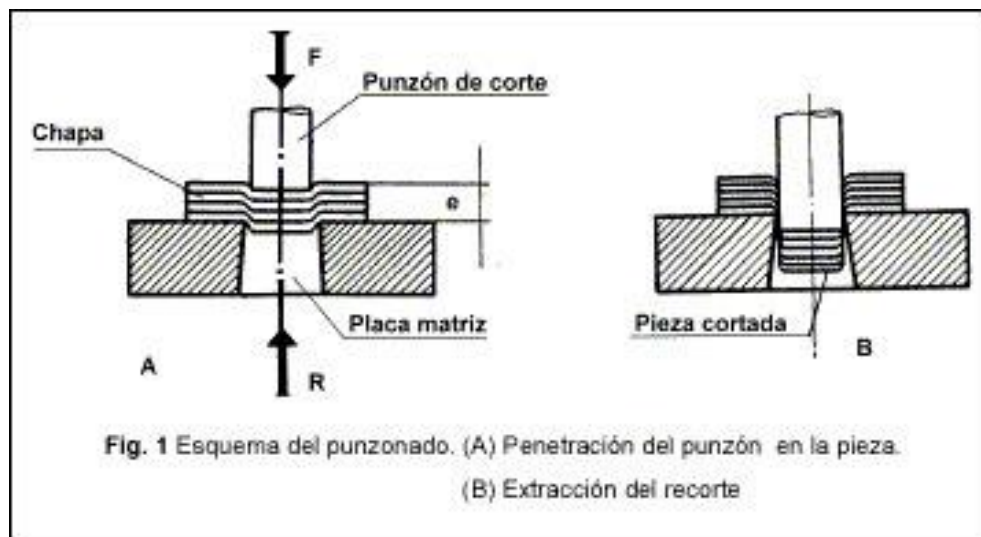


Fig. 1.- Esquema del punzonado (A) Penetración del punzón en la pieza

En general, la mayoría de los estudios efectuados sobre la mecánica del proceso de deformación plástica y corte, tienen como finalidad analizar los defectos que se presentan en el borde de las piezas punzonadas. Los primeros resultados de los estudios sobre los mecanismos de corte en punzonado se producen a comienzos de la década de los cincuenta, en Alemania (Keller) y en Japón (Fukui y Maeda) simultáneamente. Hoy en día, los estudios se centran en la obtención de modelos matemáticos que junto con el método de los elementos finitos permitan el cálculo de las fuerzas, determinar calidad del borde de la pieza y la simulación del proceso.

MAQUINA	HERRAMIENTA	MATERIAL	PIEZA	ENTORNO
Potencia	Geometría	Características del material	Geometría	Organización del proceso
Características estructurales	Tipo de material	Tratamiento superficial	Espesor	Organización de la producción
Accionamiento	Tratamiento superficial		Calidad	
Regulación				

Tabla 1. Distintos factores que intervienen en el punzonado.

2. ANÁLISIS DEL PROCESO DE PUNZONADO

2.1. Mecánica del corte

En el proceso de punzonado se pueden considerar tres etapas (figura 2):

1. **Deformación:** los esfuerzos del punzón sobre la chapa metálica, originan en ésta una deformación, inicialmente elástica y después plástica, alrededor de los bordes del punzón y matriz.
2. **Penetración:** los filos de corte del punzón y matriz penetran dentro del material, produciéndose grietas en el material debido a la concentración de tensiones a lo largo de los filos de corte.
3. **Fractura:** las grietas originadas a uno y otro lado de la chapa se encuentran, originando la separación del material. Asimismo, el punzón continúa su descenso para expulsar el recorte. El juego de corte J , permite la penetración del punzón en la matriz (figura 3) y la expulsión del material cortado.

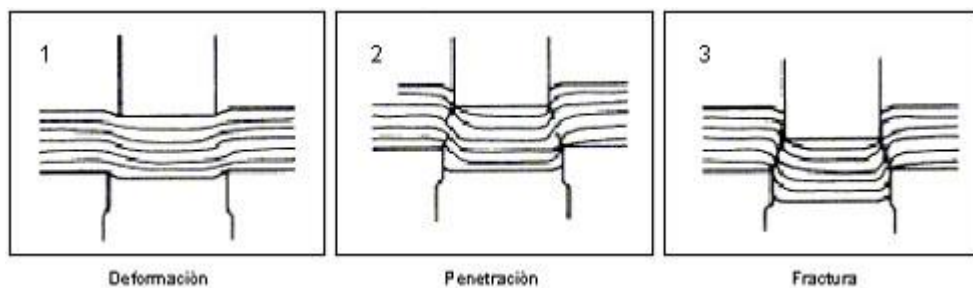


Fig. 2.- Etapas del punzonado

El juego de corte J tiene un efecto importante en el proceso de corte y se define como la distancia lateral entre el filo del punzón y el filo de la matriz. En general, el valor del juego de corte suele expresarse de dos maneras, bien como porcentaje respecto al espesor de la chapa e (juego de corte relativo) o dando el valor de la distancia entre los filos. En el caso de punzones de sección circular, el juego de corte será la mitad de la diferencia de diámetros de la matriz y el punzón, aunque es frecuente encontrar datos de fabricantes que se refieren a la diferencia de diámetros de la matriz y punzón ($2J$).

El corte por punzonado produce varias características en los bordes de la chapa y del material cortado. Estas características son (figura 3):

1. Deformación plástica caracterizada por un pequeño radio R .
2. Zona bruñida de aspecto brillante caracterizada por el ancho D .
3. Fractura angular, con aspecto mate, definida por la penetración P .
4. Rebaba caracterizada por su altura H .

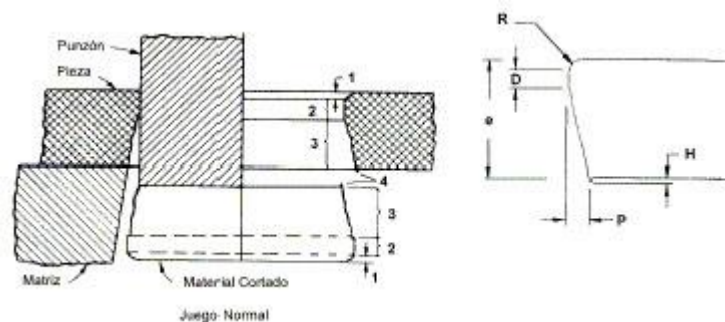


Fig. 3.- Características del borde de corte con juego normal

Todas estas características del borde cortado dependen del tipo, dureza y espesor del material, juego entre punzón y matriz, estado de los filos de corte, sujeción del material y tamaño del punzón en relación al espesor de la chapa. Las dimensiones de la zona 2 (figura 3) las determina el punzón, en el caso de la chapa, o la matriz, en el caso del material cortado.

La extensión de la zona 1 deformada plásticamente junto con la zona 2 bruñida, se representan como porcentaje del espesor del material y definen la distancia recorrida por el punzón antes de la fractura del material. El porcentaje de la penetración del punzón varía con el tipo y dureza del material. Así, a medida que aumenta la dureza del material, el porcentaje de penetración del punzón decrece. Por otro lado, la penetración del punzón aumenta cuando el tamaño del punzón es menor que 1,5 veces el espesor de la chapa, debido al alto esfuerzo de compresión a que está sometido el material en la zona de corte.

La fractura angular y la calidad del corte dependen del juego entre matriz y punzón. Con un juego insuficiente entre punzón y matriz, se produce un corte secundario. Las

grietas iniciales correspondientes al punzón y matriz no están alineadas, y por tanto, no llegan a encontrarse (figura 4). El descenso continuado del punzón produce la prolongación de las grietas y la superficie no cortada entre ellas se romperá en una fractura secundaria. En la parte inferior de la carrera del punzón, se produce un corte secundario y una segunda zona bruñida (figura 5-B). La disminución del juego, por debajo de los valores normales, provoca la disminución de todos los defectos de forma, mejorando por lo tanto, la precisión de los bordes obtenidos.



Fig. 4.- Posición relativa de las grietas según el juego

Cuando el juego empleado es demasiado bajo empiezan a aparecer cortes secundarios que perjudican la calidad de los bordes. Hay que destacar, que al disminuir el juego de corte se produce una mejora en la precisión de la pieza, sin embargo, otros factores como el desgaste de las herramientas o la energía consumida se ven afectados negativamente. En el caso de tener un juego de corte excesivo (figura 5-A) aparece una deformación plástica excesiva, una parte bruñida menor y una altura de rebaba mayor. Por otro lado, hay que resaltar que, al aumentar el juego de corte por encima de los valores normales, se consigue aumentar la vida de la herramienta en detrimento de la precisión obtenida en los bordes. Así, el juego de corte apropiado será aquel que no cause un corte secundario y tenga una deformación plástica y altura de rebaba pequeñas.

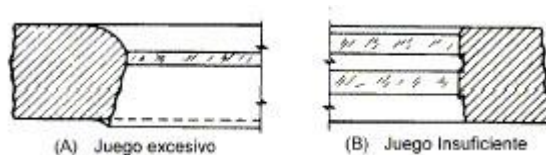


Fig. 5.- Características del borde con juego excesivo e insuficiente

Desde el punto de vista de la mecánica de la fractura del material, puede considerarse que el funcionamiento del proceso es óptimo cuando las grietas iniciadas desde el punzón y matriz se encuentran alineadas. Puesto que el juego de corte es el parámetro

que afecta más directamente a la mecánica de la fractura del material, el juego de corte óptimo deberá ser capaz de proporcionar esta alineación.

2.2. Fuerzas en el punzonado

La fuerza de corte varía en función del juego manteniendo los demás parámetros constantes. En figura 6, se representa la fuerza ejercida por un punzón de 10 mm de diámetro y su desplazamiento al cortar una chapa de acero de 2,8 mm de espesor, con diferentes juegos de corte. En general, las curvas pueden ser descompuestas en dos partes claramente diferenciadas: una primera en la que la fuerza aumenta desde cero hasta su valor máximo, punto éste correspondiente al inicio de la fractura, y una segunda en la que las grietas crecen y se completa el corte del material. La primera zona presenta un aspecto muy similar en todas las curvas, sin embargo, desde el momento en que se inicia la fractura, se desarrollan fluctuaciones importantes para los distintos juegos.

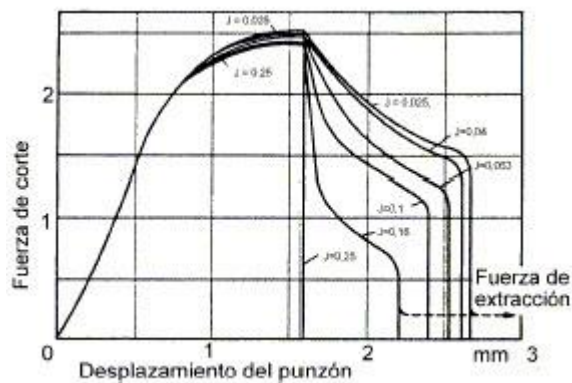


Fig. 6.- Influencia del juego de corte J sobre la fuerza de corte

7.1.2. Anexo II: Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network. [2]

4. Simulation of a blanking operation

The problem studied here consists of an axisymmetric punching operation of a metal sheet with 3 mm thickness. The geometrical data are shown in Fig. 8.

The corresponding strain hardening law takes the non-linear form

$$\sigma = \sigma_{el} + K\varepsilon_{eq}^n.$$

The mechanical characteristics of the material obtained by a tensile test are given in Table 1.

The material parameters for the damage law associated with the Lemaitre model were found to be: $\varepsilon_D = 0$, $\varepsilon_R = 0.85$, and $D_c = 0.4$.

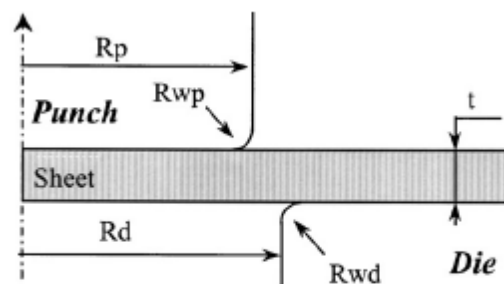


Fig. 8. Axisymmetric model of punching operation.

Table 1
Material characteristics

Material	E (MPa)	ν	σ_{el} (MPa)	R_m (MPa)	K (MPa)	n	$A\%$
1060 Steel	200 000	0.29	250	530	1048	0.196	0.3

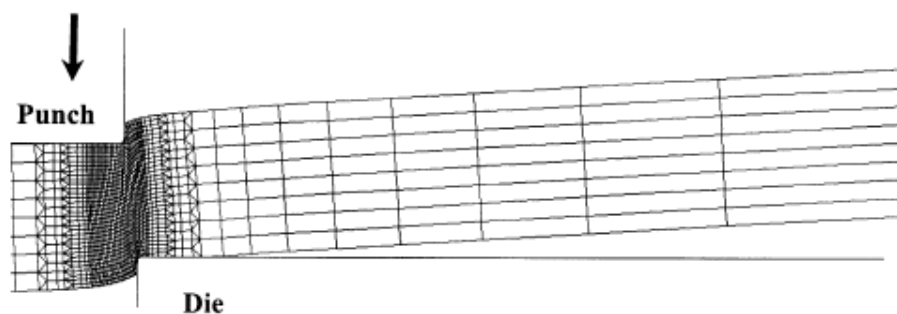


Fig. 9. Mesh used for the FE model.

In this study, the tool is modelled by adopting a rigid body hypothesis and the contact surface laws are defined by a Coulomb friction model with a friction coefficient value of 0.1.

The meshing of the model is carried out by means of 1480 quadrangular four-node axisymmetric elements. Fig. 9 shows the meshing used.

4.1. Design factors

The simulation was designed to study the following configurations:

Twelve values of clearances: $c(\%) = \{1; 3; 5; 7; 9; 10; 12; 14; 15; 17; 19; 20\}$.

Four geometric shapes of the tool were chosen corresponding to:

- New die with $R_{wd} = 0.01$ mm.
- Four punches with different edge radii $R_{wp} = \{0.01; 0.06; 0.12; 0.2\}$ mm.

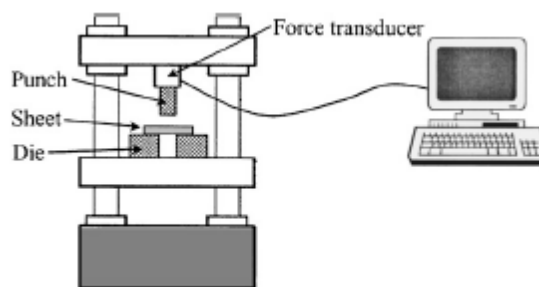


Fig. 10. Schematic illustration of the testing device.

Forty-eight simulations were performed according to the whole combinations of the above data.

5. Experimental procedure

Experiments using devices equipped with electrical gages and force transducer were performed by a 4000 KN hydraulic press in order to verify the validity of the proposed neural network. A schematic illustration of the experimental equipment is shown in Fig. 10.

The problem studied here consists of an axisymmetric blanking operation of Fig. 8.

Carbon steel (0.6% C) was blanked using a 40 mm diameter die and a range of punch-die clearances from 5% to 20%. Punches and dies were of edge radii in the range 0.01–0.2 mm.

Quantitative measures of burr height are difficult by any standard means of measurement.

The precise measurement of burr height was made possible by using metallographic techniques. The specimens were carefully cross-sectioned and polished so that the burr areas were not damaged. The burr heights were then measured from these micrographs. Since the magnifications for these micrographs were known, the actual burr heights could be calculated.

6. Results and discussion

Training a ANN involves gradual reduction of the error between ANN output and the target output. The performance of the developed ANN measured by MSE error vs. the training number (epochs) is presented in Fig. 11. It can be shown that after 2000 training cycles, the curve stabilizes which means that the ANN has been sufficiently trained.

Results of the network training are presented in Fig. 12 which shows a perfect match between the target output and the ANN output. The maximum error was less than 0.1% for any point.

Fig. 13 presents the results of burr height variation vs. the tool clearance obtained by experiment and ANN computations. In the case of the proposed experimental investigation, one clear trend is that burr height increases as the clearance increases. The ANN computation shows the same trend of the experimental results. It can be shown that results are in good agreement with a deviation of 10% between predicted and experimental values.

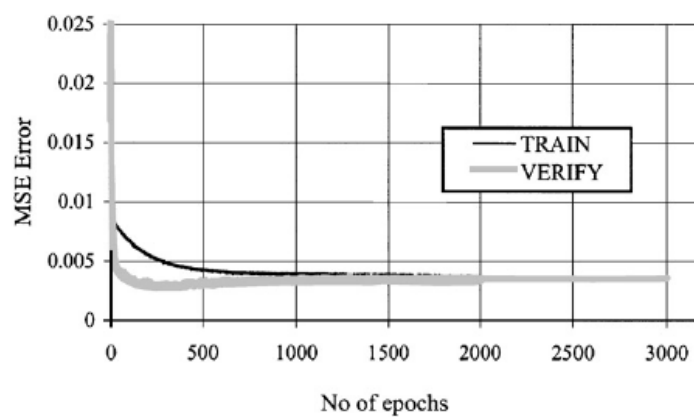


Fig. 11. MSE error vs. training number (epochs).

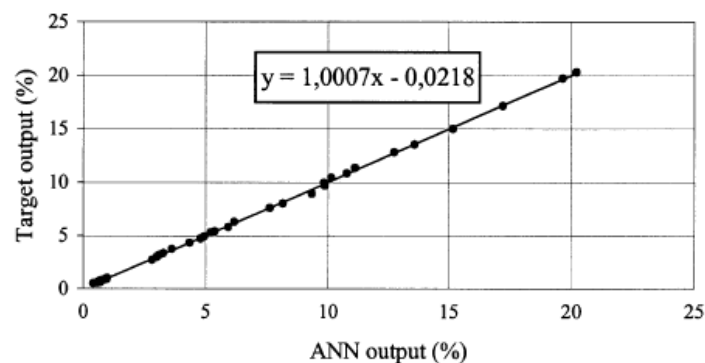


Fig. 12. Computed ANN output vs. target outputs.

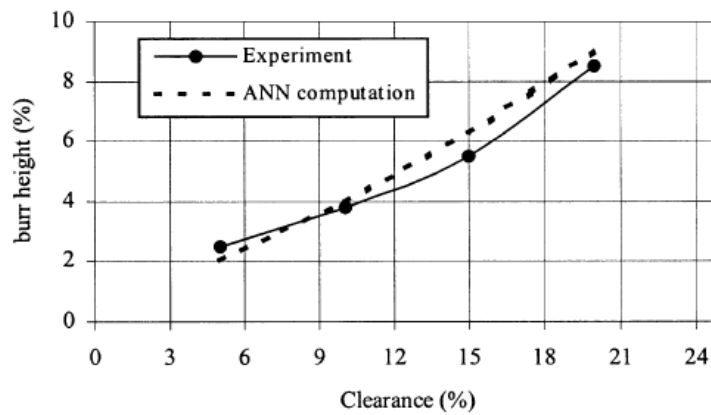


Fig. 13. Burr height evolution vs. clearance.

Fig. 14 shows the evolution of the burr height according to the punch wear radius (R_{wp}) obtained by the experiments. This curve is compared with that obtained by ANN calculations for different edge radii of the punch.

A good correlation can be observed between the ANN prediction and the experimental results.

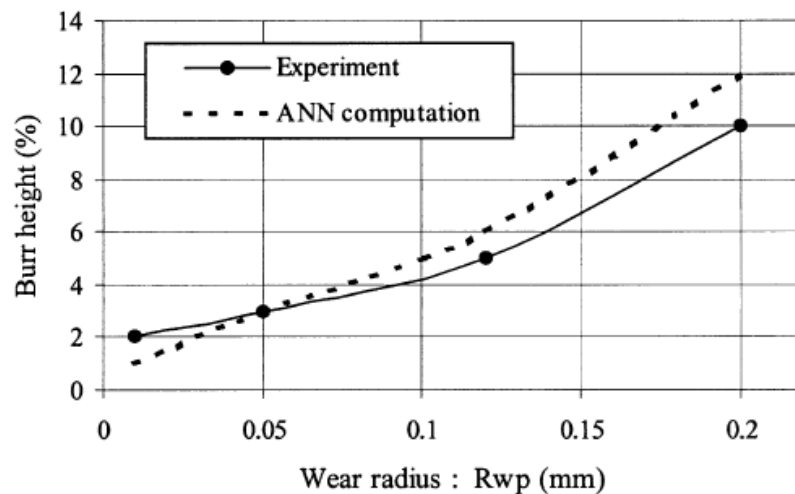


Fig. 14. Burr height evolution vs. tool wear (clearance = 10%).

7. Conclusion

Sheet metal blanking is one of the main industrial processes for forming mechanical parts, therefore attention must be focused on its modelling.

In this study, a trained set of backpropagation neural network algorithm is used to predict the burr height formation on blanked parts vs. the tool clearance and its wear state.

Initially, finite element simulations of circular blanking process were conducted with different blanking conditions. A backpropagation training neural network model was trained by using the numerical results. The network has been employed as numerical devices for substituting the finite element code needed for the burr height prediction of the sheared part.

The major advantage of the neural network predictions is that the model can estimate burr height very fast and accurately. Through the investigation, it becomes clear that the finite element method and optimization techniques based on the use of artificial neural networks can reduce the trial and error to design a sheet metal blanking process.

The ANN results compared with the experimental ones show the reliability of the model in predicting the burr height evolution vs. the clearance and the tool wear state.

In general, the need of regrinding of the tool is determined on the basis of allowable burr height of the blanked part. The proposed finite element coupled with ANN can be used in order to contribute towards the development of a system for the on-line assessment of burr height evolution during the blanking processes.

7.1.3. Anexo III: Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment. [3]

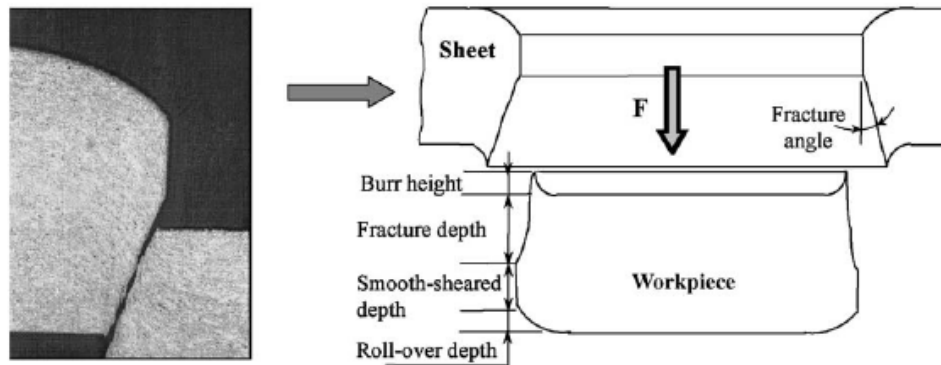


Fig. 9. Geometry of the sheared workpiece.

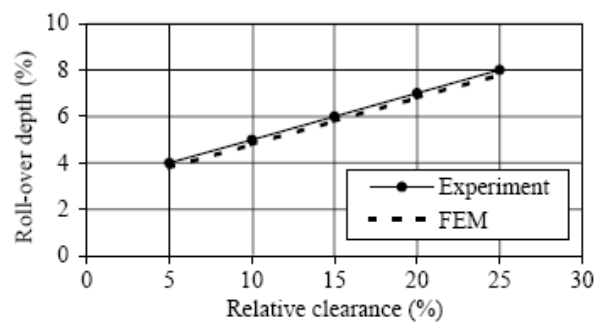


Fig. 10. Evolution of the roll-over depth (H_{bb}) vs. the clearance.

In order to check the fracture criteria validity in blanking modelling, different FEM simulations have been performed for different clearances.

Fig. 10 illustrates the evolution of the roll-over depth H_{bb} vs. the clearance obtained by experiments of blanking on 1060 steel sheet and numerically.

It can be shown that H_{bb} depth evolves linearly according to the clearance.

The evolution of the sheared zone depth H_1 vs. the clearance obtained by numerical calculation is compared with the experimental results (Fig. 11).

It can be observed, that the predicted and experimental curves coincide very well even for high and small clearances. The results shows the strong dependence between the sheared area depth and clearances in the range 2–10%. For clearances greater then 10%, H_I depth variation is uniform.

The punch penetration corresponding to crack initiation vs. clearance from both numerical calculation and experiments are plotted in Fig. 12.

The experimental curve shows that the smallest penetration causing the rupture of sheet is that which corresponds to the clearance $c = 15\%$. It can be shown that results are in good agreement.

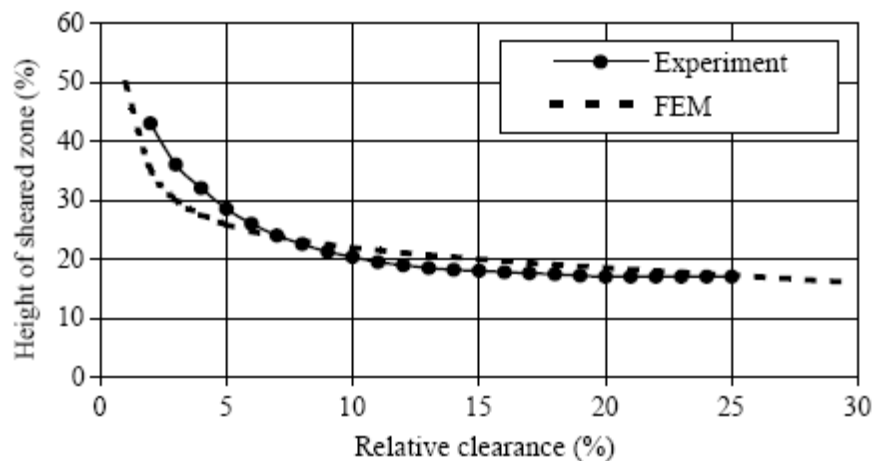


Fig. 11. Evolution of the sheared zone depth (H_I) vs. the clearance.

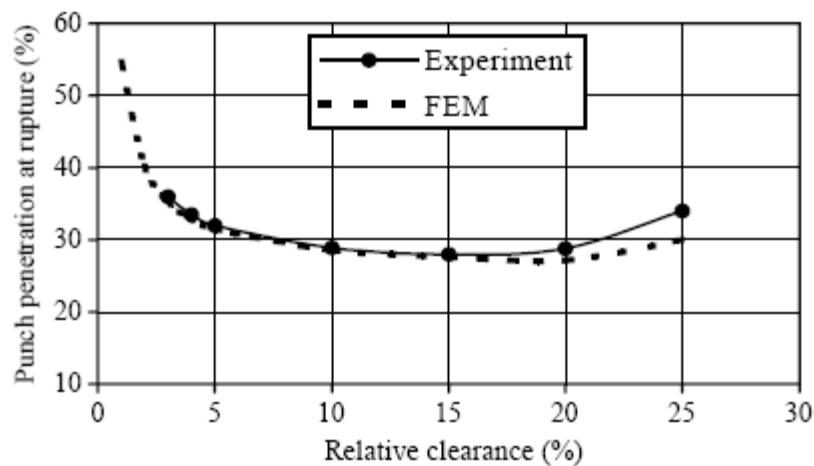


Fig. 12. Punch penetration corresponding to the crack initiation vs. clearance.

6. Conclusion

This paper has described an inverse technique approach using the FEM. The model allows for the identification of the critical values of fracture criteria valid for crack initiation modelling generated by shearing mechanisms. The proposed identification technique is based on a simulation-experiment coupled approach using blanking experiments. The aim is to minimize an objective function in order to reduce the difference between the computed and the experimental values of the blanking force–penetration curve. The critical values of the fracture criteria are then calibrated by computer-simulated blanking experiments of circular process.

The proposed methodology can be used for blanking processes design to choose the process leading parameters in an optimal way that ensure a high-quality part.

7.1.4. Anexo IV: Blanking tool wear modeling using the finite element method. [4]

Fig. 8 shows the wear profile of the punch obtained by the numerical prediction and the experimental results after 20 000 blanking cycles.

It can be observed that the wear profile predicted by the proposed wear model give good results compared to experimental ones. A comparison between experimental and predicted wear profiles shows that the deviation does not exceed 10%. Wear resulting from punch/sheet contact causes the cutting edges to be rounded [13], hence it affects the quality of the parts produced and generates the burr formation [8,9,11]. The influence of tool wear on the blanking process can be modelled in a simplified manner by changing the value of the punch edge radius R_{usp} .

Several calculations were performed in order to compare the numerical results with experimental data. The influence of the tool wear on the punching force and on the evolution of the sheared profiles was accounted for.

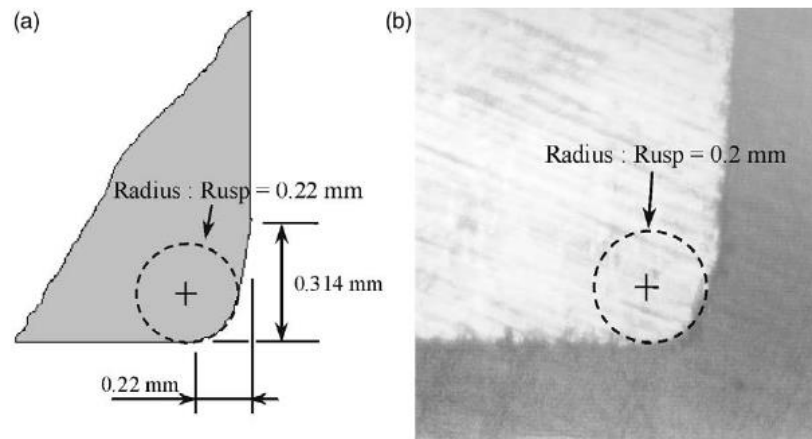


Fig. 8. Wear profile of the punch after 20 000 blanking cycles. (a) F.E.M. calculation. (b) Experiment.

In Fig. 9(a), the evolution of the punching forces relative to the punch penetration for different simulations are shown.

When the material damage is taken into account, it is possible to simulate the punch penetration up to 80% of the sheet's thickness, in spite of a large mesh distortion.

The experimental plots in Fig. 9(b) show that for the various states of punch wear, there is no difference between the maximum blanking loads. Nevertheless the punch penetration U_{dr} corresponding to the crack initiation in the sheet-material increases with an increase in punch wear. This is due to relative increase in the contact area between the punch and the sheet.

The punch penetration evolution U_{dr} corresponding to the crack initiation against the wear parameter R_{usp} obtained by experiments on 1060 steel and F.E.M. simulations, is plotted in Fig.10. The results shows that the punch penetration prior to fracture increases linearly with increases in the value of the punch wear radius.

The two blanked profiles obtained by finite element calculation and experiment corresponding to a new punch with a cutting edge radius $R_{usp} = 0.01$ mm and a worn punch with $R_{usp} = 0.2$ mm, are shown in Fig. 11(a) and (b). As can be expected, in the case of a worn punch, the profile of the part boundary presents a bad quality due to the presence of a burr.

The numerical results compared with the experimental ones, show the reliability of the finite element model according to the aforementioned wear algorithm prediction in describing the influence of punch wear on the burr formation.

Fig. 12 shows the evolution of the burr height with increasing punch wear radius obtained from experiments and F.E. simulation.

It can be shown that results are in good agreement with deviations of 11% between predicted and experimental values.

F.E. simulation indicates that punch initiates cracks at the cutting edges of the tools. Secondly, the cracks propagate in the same direction of punch penetration as is illustrated by the curves in Fig. 13. These curves show the relations between relative crack propagation depth (expressed as a percentage of sheet thickness) and the relative punch displacement obtained by experiment and simulation, for new and worn punches. Crack initiation and propagation can be predicted accurately.

From the moment of crack initiation to complete rupture of the sheet, experimental and numerical results are in good agreement.

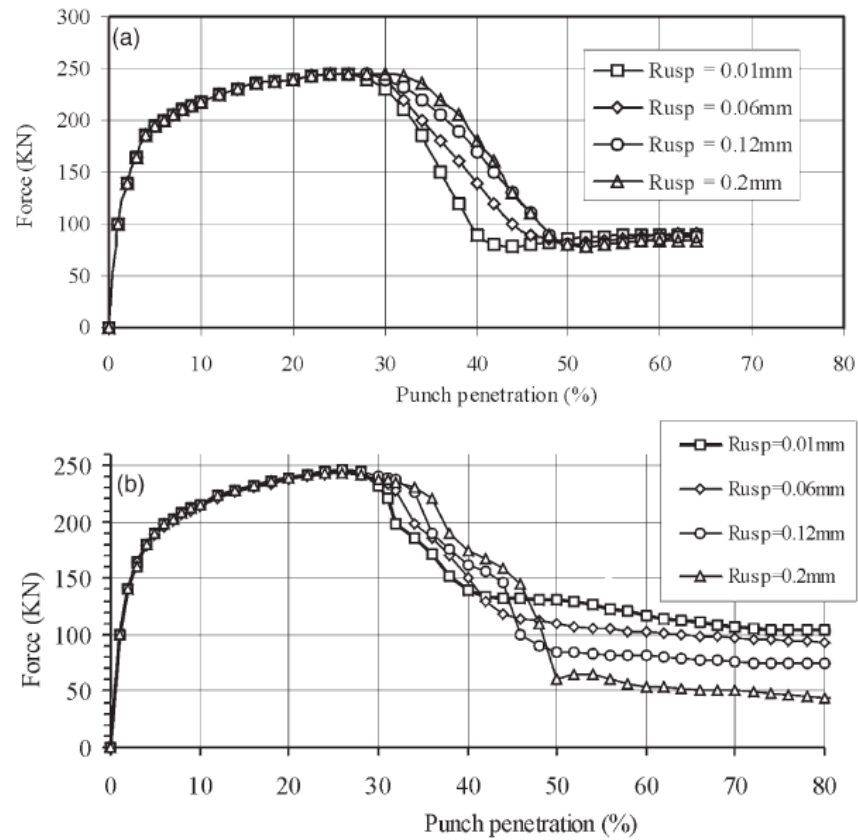


Fig. 9. Punching force versus punch travel for four wear states. (a) Simulation. (b) Experiment.

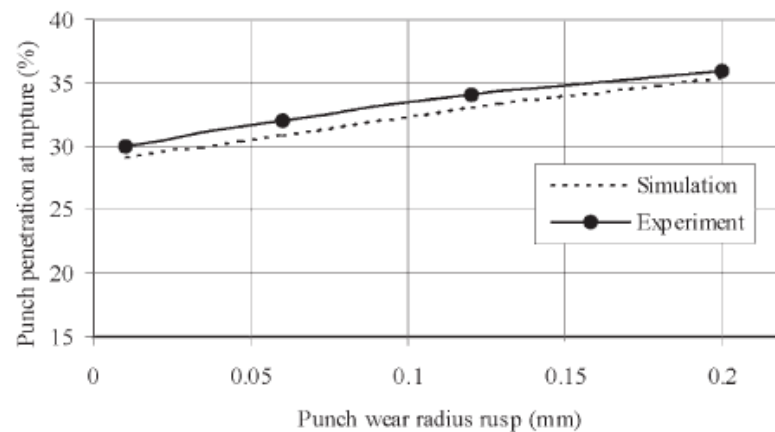


Fig. 10. Punch penetration at rupture U_{dr} versus the wear radius R_{usp} .

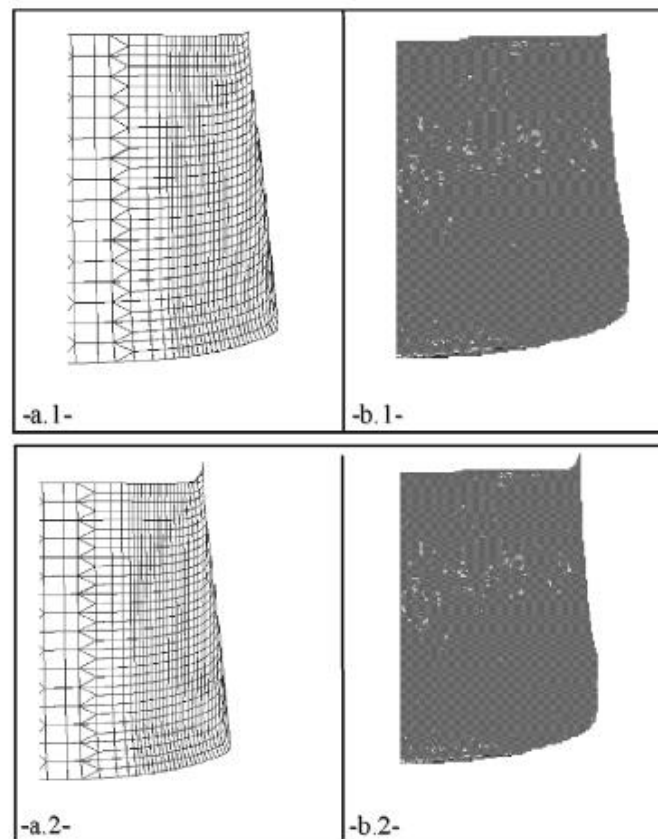


Fig. 11. Predicted and experimental blanked profiles corresponding to two states of the punch wear (clearance=10%). (a) New punch: $R_{usp}=0.01$ mm. a1, Simulation; b1, experiment. (b) Used punch: $R_{usp}=0.2$ mm. a2, Simulation; b2, experiment.

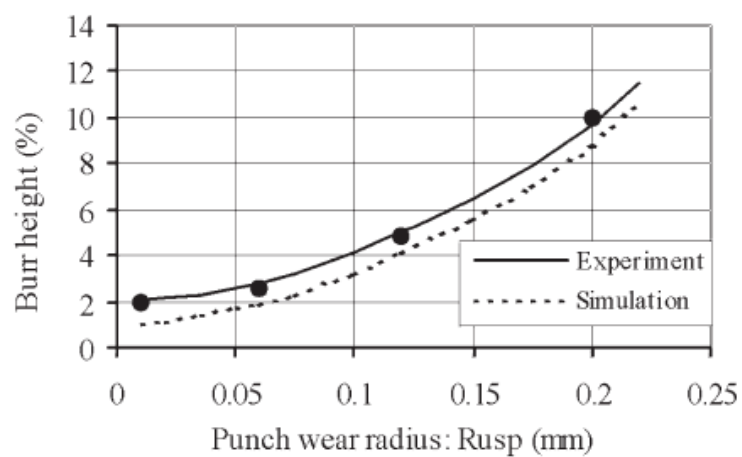


Fig. 12. Evolution of the burr height versus the punch wear radius.

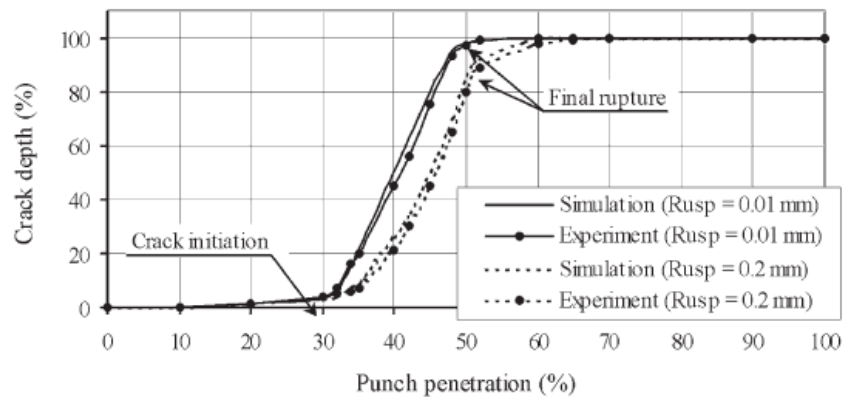


Fig. 13. Crack propagation versus punch penetration.

7. Conclusions

In this investigation, a tool wear prediction algorithm has been implemented into a finite element code in order to predict tool wear evolution during blanking/punching processes. The comparative study between the experimental results and the numerical ones shows the good agreement.

The numerical results compared with the experimental ones, show the reliability of the model in predicting the tool wear profile as well as burr height evolution versus the blanking cycles. From an industrial point of view, the wear model can be used to assess the tool life for a given application.

In order to predict tool life and the tribological loading applied on the tool, the proposed wear model can be used in other sheet metal forming processes if the same wear mechanisms are active. The two curves of Fig. 13 are sufficiently close to conclude that the procedure that we propose to simulate crack initiation and propagation, gives good results.

In general, the need for regrinding of the shearing tool is determined on the basis of allowable burr height on the final product. The proposed wear algorithm allows for the prediction for the need of tool regrinding in two steps. During the first step, one can compute the tool radius variation versus the number of blanking cycles. During the second step, it is possible to predict the burr height corresponding to the number of blanking cycles. This wear analysis is very helpful to improve the reliability of the shearing tool and to determine the tool repair or change.

7.2. Referencias

- [1]. Mateos, S.; Rico, J.C.; Cuesta, E.; Valiño, G. Aspectos analíticos y tecnológicos del proceso de punzonado de chapa. Departamento de Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo 2004
- [2]. Ridha Hambli. Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network. International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002) 2089–2102.
- [3]. Ridha Hamblia y Marian Reszka. Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment. International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002) 1349–1361.
- [4]. Ridha Hambli. Blanking tool wear modeling using the finite element method. International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1815–1829.
- [5]. ASM Specialty Handbook. Tool Materials. ASM International.
- [6]. Enrico Bugini. Principi per la lavorazione plastica dei metalli. Bologna, casa Ed. L. Cappelli.
- [7]. Apuntes de la asignatura de Tecnología de Fabricación de la Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería de Fabricación.